

**Effektivität der Zahnbewegungen bei einer
Aligner-Behandlung**

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Hohen Medizinischen Fakultät
der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität
Bonn

Lena Schrott
aus Mönchengladbach
2016

Angefertigt mit der Genehmigung
der Medizinischen Fakultät der Universität Bonn

1. Gutachter: Prof. Dr. rer. nat. Christoph Bourauel
2. Gutachter: Prof. Dr. med. dent. James Deschner

Tag der Mündlichen Prüfung: 23.05.2016

Aus der Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik, Propädeutik und Werkstoffwissenschaften der Universität Bonn

Direktor: Prof. Dr. med. dent. Helmut Stark

- Stiftungsprofessur für Oralmedizinische Technologie -

Prof. Dr. rer. nat. Christoph Bourauel

Inhaltsverzeichnis

1.	Einführung	5
1.1	Einführung in die Thematik.....	5
1.2	Historische Literaturübersicht	7
1.2.1	Einteilige Positioner	8
1.2.2	Monomaxilläre Positioner	11
1.3	Invisalign®-System.....	12
1.3.1	Behandlungsablauf in der Praxis	14
1.3.2	Invisalign®-Teen	17
1.4	Behandlungsspektrum und Effektivität von Invisalign®	18
1.5	Biomechanik.....	21
2.	Fragestellung und Ziele	23
3.	Material und Methode.....	24
3.1	Auswahl der Modelle	25
3.2	Vorbereitung der Modelle	26
3.3	Ausrichten der Modelle.....	28
3.4	Einzelzahnbewegungen	29
3.5	Zahneigenes Koordinatensystem	30
3.6	Datenanalyse	30
3.6.1	Berechnung der gewichteten mittleren relativen Effektivität	32
3.6.2	Statistische Analyse	33
4.	Ergebnisse	35
4.1	Einführung einer Bewertungsskala.....	35
4.2	Ergebnisse der gesamten Patientendaten.....	36
4.3	Ergebnisse der Invisalign®-Teen-Patientengruppe T.....	44
4.4	Ergebnisse der Erwachsenengruppe A	52

4.5	Statistische Auswertung	60
4.5.1	Vergleich zwischen Ergebnissen der Patientengruppe A und T	60
4.5.2	Vergleich der Ergebnisse der Zahngruppen untereinander	62
4.5.3	Vergleich der Ergebnisse von mehrwurzeligen und einwurzeligen Zähnen..	64
5.	Diskussion	65
5.1	Diskussion der Ergebnisse	65
5.2	Diskussion der Methode	68
5.3	Diskussion der Ergebnisse in Bezug auf die klinische Bedeutung	70
6.	Zusammenfassung.....	72
7.	Literaturverzeichnis	74

1. Einführung

1.1 Einführung in die Thematik

Der Wunsch des Patienten nach einer verbesserten Ästhetik ist ein häufiger Grund für kieferorthopädische Behandlungen. Gerade und weiße Zähne sind vor allem in den letzten Jahrzehnten immer mehr zum Symbol für soziale Akzeptanz und Erfolg geworden (Brachwitz, 2001; Tjan und Miller, 1984). Doch auch der kieferorthopädische Weg zu einem vermeintlich ästhetischeren Aussehen soll möglichst unauffällig sein (Cooper-Kazaz et al., 2013; Meier et al., 2003; Rosvall et al., 2009; Tjan und Miller, 1984). Die Möglichkeiten einer solchen, optisch nur minimal einschränkenden kieferorthopädischen Behandlung sind Behandlungen mittels Keramik Brackets, Lingualtechnik und Alignern (Abbildung 1).



Abbildung 1: Vergleich zwischen Keramikbrackets (links), Lingualapparatur (Mitte) und Aligner (rechts), (Dong und Derakhshan, 2006).

Studien zeigen allerdings, dass Brackets in unauffälliger Keramik nicht unbedingt als weniger ästhetisch störend aufgefasst werden als die konventionelle Variante (Fonseca et al., 2014). Die Lingualtechnik ist hier optisch unauffälliger, weist jedoch Probleme bei der Phonetik auf (Shalish et al., 2012). Anders ist es bei der Aligner-Behandlung. Sie bedarf zwar einer höheren Compliance des Patienten, da es sich um eine herausnehmbare Apparatur handelt (Boyd und Waskalic, 2001; Rollet et al., 1991; Wells, 1970), es

treten dagegen jedoch kaum Spracheinschränkungen auf (Nedwed und Miethke, 2005). Auch in anderen Bereichen treten Probleme, wie zum Beispiel Einschränkungen im alltäglichen Leben während des Essens, ästhetische Mängel und geringer Tragekomfort bei Patienten, die mit dem Aligner-System behandelt wurden, seltener auf (Joffe, 2003; Miller et al., 2007; Nedwed und Miethke, 2005; Shalish et al., 2012). Des Weiteren erscheinen die Möglichkeiten der Mundhygiene bei der Aligner-Therapie günstiger im Vergleich zu Lingual- und Multibandtherapie (Azaripour et al., 2015; Karkhanechi et al., 2013; Miethke und Brauner, 2007; Tuncay et al., 2013). Dies führt nachweislich zu einem geringeren Attachmentverlust während der Behandlung, was vor allem bei der kieferorthopädischen Therapie von älteren Patienten von hoher Bedeutung ist (Karkhanechi et al., 2013; Turatti et al., 2006).



Abbildung 2: Kunststoff-Attachments auf den Oberkiefer und Unterkiefer-Prämolaren (Kou und Duong, 2006).

In der Literatur wurde immer wieder darüber diskutiert, ob durch eine Behandlung mit Alignern auch komplexere Malokklusionen korrigiert werden können. Die Kippung der einzelnen Zähne scheint wahrscheinlicher zu sein als ein körperlicher Versatz und so steht die Aligner-Therapie in dieser Hinsicht in deutlichem Nachteil zu den festsitzenden Apparaturen (Baldwin et al., 2008; Bollen et al., 2003). Aus diesem Grund arbeiten Hersteller solcher Aligner-Schienensysteme, wie z.B. Clear Aligner, Essix und Invisalign®, an weiteren Entwicklungen, die das Behandlungsspektrum erweitern und auch komplexere Bewegungen der Zähne möglich machen sollen. Unter anderem wird dies bereits jetzt durch Kompositaufbauten auf den lingualen oder bukkalen Flächen der Zähne, sogenannten Attachments (Abbildung 2), die den Kraftansatz verändern oder durch Gummizüge, die therapiebegleitend genutzt werden, erreicht (Bourauel et al., 1997; Kou und Hordt, 2001; Kravitz et al., 2008). Die Deutsche Gesellschaft für Kieferorthopädie formulierte 2010 in einer Stellungnahme die Indikationsbereiche der Aligner-Therapie. Moderate Dysgnathiefunde, Pro- und Retrusion der Front sowie In- und Extrusion der Frontzähne (mit Attachmentverwendung) seien der Hauptindikationsbereich. Der Lückenschluss nach Prämolarenextraktion sowie die Rotation einzelner Zähne sei jedoch nur bedingt durchführbar (Göz, 2010).

1.2 Historische Literaturübersicht

Als Urheber der herausnehmbaren Schienentherapie im Bereich der Kieferorthopädie ist H.D. Kesling zu nennen. Dieser entwickelte bereits 1945 die sogenannte „Tooth Positioner Appliance“, zu sehen in Abbildung 3, eine einteilige elastische Kunststoffschiene, die anfangs nur zur Stabilisierung der Zahnstellung nach konventioneller Behandlung diente (Kesling, 1945). Kesling selbst beschrieb ebenfalls die Verwendung dieser Positioner um finale Zahnbewegungen, durchzuführen und so das Ergebnis der konventionellen Methode durch minimale Zahnbewegungen zu optimieren (Kesling, 1946). Neben diesen einteiligen, individuellen Positionern wurden individuelle, bimaxilläre und konfektionierte Positioner entwickelt. Da diese konfektionierten Apparaturen jedoch nur selten an die Passgenauigkeit der individuell hergestellten herankommen, gelten sie heutzutage nicht mehr als angebrachte Alternative (Schopf, 2000).



Abbildung 3: Keslings einteiliger „Tooth Positioner“ aus elastischem Kunststoff (Hauschopp, 2012).

1.2.1 Einteilige Positioner

Um Keslings Behandlungsapparaturen herzustellen, ist es zunächst erforderlich ein sogenanntes Set-Up-Modell (Abbildung 4) herzustellen. Hierzu wird aus den Gipsmodellen der Patienten jeder zu bewegende Zahn segmentiert und anschließend mittels Wachs in die gewünschte Position verschoben. Dies diente nicht nur zur Unterstützung der Festlegung des Behandlungszieles, sondern ermöglichte zudem auf einem duplizierten Modell die Herstellung der elastischen Kunststoffschiene (Kesling, 1945).

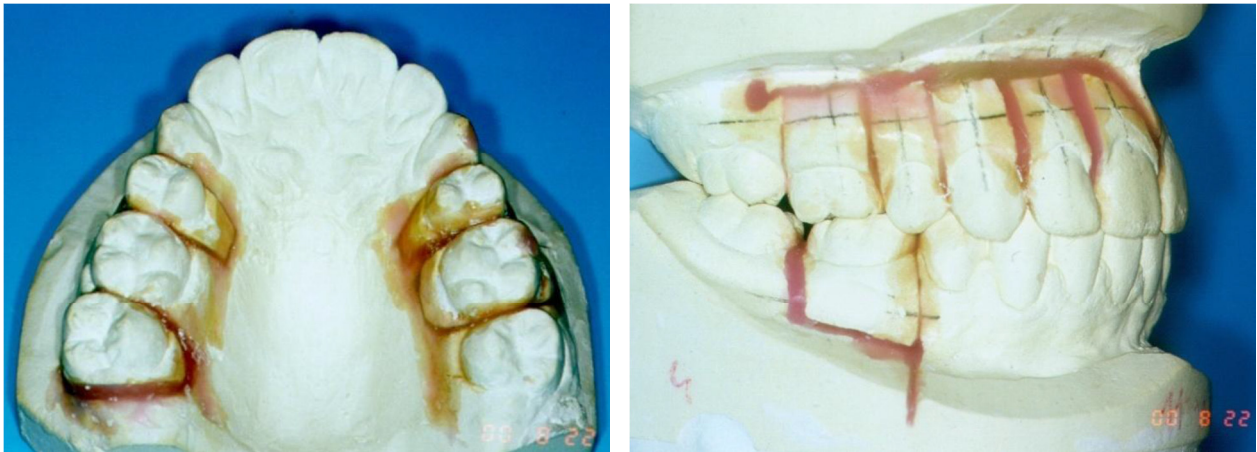


Abbildung 4: Set-Up-Modell aus Gips mit segmentierten und mit Wachs an der gewünschten Position wiederbefestigten Zähnen. Die Herstellung der elastischen Kunststoffschienen erfolgt auf einem Duplikat des Set-Up-Modells (Hauschopp, 2012).

Bei der Herstellung ist darauf zu achten, dass sowohl die Unterkiefer- als auch die Oberkieferzähne in der Schiene oral und vestibulär gefasst werden. Auch der intermaxilläre Raum, so Kesling, muss von Kunststoff ausgefüllt sein, um eine optimale Krafteinwirkung zu erzielen (Kesling, 1945).

Kesling vermutete, dass durch eine vorangegangene Behandlung die Zähne beweglicher waren und so eine Zahnbewegung durch die Positioner unterstützt wurde. Er ging trotzdem davon aus, dass durch mehrere Positioner, die auf schrittweise veränderten Set-Up-Modellen hergestellt wurden, eine rein Positioner gestützte Behandlung durchgeführt werden kann. Ihm erschienen auch größere Zahnbewegungen durchaus durchführbar. Zu diesem Zeitpunkt fehlten allerdings noch die technischen Mittel, um dieses neuartige Therapiemodell zu realisieren (Kesling, 1945).

Die kieferorthopädische Behandlung ohne Drähte erschien auch Elsasser (1950) als „Meilenstein“ der kieferorthopädischen Techniken. Er kritisierte jedoch die Verwendung der sehr elastischen Materialien bei der Langzeitstabilisierung der Zähne. Durch das Herausnehmen und Hereinsetzen der Schiene würde den Zähnen eine negative Kraft zugefügt werden, die die dauerhaft optimale Zahnstellung verhindern würde. Er gab daher eine optimale Tragedauer von sechs bis acht Wochen an, woran sich eine herkömmliche Retainer-Therapie anschließen sollte (Elsasser, 1950).

Auch weitere zehn Jahre später ging noch Vorhies (1960) davon aus, dass eine längere Tragedauer über sechs Wochen nach der konventionellen Behandlung nicht indiziert sei. Vorhies beobachtete in einer Studie mit zehn Patienten, dass kleine Bewegungen, wie Lückenschluss, Rotationen, Wurzelorque der Frontzähne sowie Reduktion von Kreuzbissen und offenen Bissen durchführbar sind (Vorhies, 1960). In- und Extrusionsbewegungen schienen nur schlecht durchführbar. Dies wurde auch in späteren Studien belegt (Hauschopp, 2012). Vorhies war bewusst, dass der Erfolg der Behandlung erheblich von der Compliance des Patienten abhängt. Er erreichte durch vorherige Gespräche und Aufklärung eine durchschnittliche Tragedauer von 17,3 Stunden am Tag.

Neben der Compliance des Patienten ist ebenso das Material der Schienen ein wichtiges Kriterium zum Erfolg (Cottingham, 1969; Wells, 1970). Das Material sollte nicht zu starr sein, sodass die Patienten es problemlos über die Zahnreihen ziehen können und trotzdem so unflexibel, dass es gezielte Kraft ausüben kann. Cottingham prüfte einen Kunststoff namens „Impak“ (C. M. P. Industries, Albany, New York). Dieser erwies sich aufgrund seiner thermoplastischen Eigenschaften als sehr erfolgversprechend. Wurden die Schienen mit kochendem Wasser überschüttet, so entstand eine Flexibilität, die ein leichtes Überziehen dieser ermöglichte und nach dem Abkühlen wieder verschwand (Cottingham, 1969). Der Autor wies zudem auf die enorme Bedeutung des gelenkbezogenen Ausrichtens während des Herstellungsvorgangs hin, da technische Fehler bei einer handgeführten Positionierung gravierende Fehlkorrekturen mit sich bringen könnten (Cottingham, 1969). In späteren Studien wurden diese Materialien dann immer weiter untersucht und verbessert (Engelke, 2010; Rost et al., 1993, 1995).

In einer Patientenstudie mit 29 Patienten prüfte Wells (1970) ebenfalls die Möglichkeiten der Schienentherapie. Er teilte die Patienten in fünf Gruppen auf, wobei teilweise Patienten zuvor mit der Multiband-Therapie behandelt wurden, zum Teil aber die Behandlung auch aus einer reinen Schienentherapie bestand. Er kam zu dem Ergebnis, dass sich die Positioner als Retainer eignen, allerdings auch kleine Bewegungen sowie Kippungen durchaus mit diesen durchführbar seien. Wells legte außerdem ein Augenmerk auf durchbrechende Zähne, die von den Positionern in die gewünschte Position geführt werden konnten (Wells, 1970).

Die zuvor sehr aufwendige Herstellung der Schiene, bei der diese modelliert werden musste, wurde 1976 durch die Vorstellung des Tiefziehverfahrens vereinfacht. Bei der neuen Produktionsmethode verwendete man eine Bioplast-Tiefziehfolien aus Ethylvinylacetat mit einer Stärke von zwei Millimetern. Diese werden durch Erhitzen formbar gemacht und anschließend mittels Druck über die einzelnen Zahnreihen gezogen. Die so entstehenden Schienen des Ober- und Unterkiefers werden thermisch verbunden, abgerundet und stehen dem Patienten bereit (Andersen und Schramm, 1976).

Eine weitere Variante der Positioner stellten Roth und Gordon (1981) vor, den sogenannten „gnathologischen Positioner“. Genau wie Cottingham (1969) verwiesen die Autoren auf die Bedeutung der gelenkbezogenen Artikulation im Artikulator. Der gnathologische Positioner sollte zur Stabilisierung bzw. Annäherung an die zentrische Okklusion nach einer Multiband-Behandlung dienen. Als Limit der Bewegungen zeigten Roth und Gordon 3,5 mm in vertikaler, 1,5 mm in sagittaler und 2 mm in transversaler Richtung an (Roth und Gordon, 1981).

Rollet et al. stellten 1991 fest, dass die Herstellung der Schienen problematisch sein könne, sobald man Hilfsmittel, wie Kunststoffbrackets nutze, um die Kraftanwendung zu verändern. Er gab an, dass Bewegungen bis zu 4 mm mit einem Positioner durchführbar seien, solange man unterstützend Brackets unter den Schienen und extraorale Verankerungen anwendet. Des Weiteren seien je nach Materialzusammensetzung und Elastizität eine Retention, ein Finishing oder größere orthodontische bzw. orthopädische Bewegung durchführbar (Rollet et al., 1991).

1.2.2 Monomaxilläre Positioner

Ponitz beschrieb 1971 eine neuartige Vorgehensweise für die Herstellung von zweigeteilten Schienen. Bei dieser wurden die Schienen pro Kiefer mit einem Vakuum-Verfahren hergestellt (Ponitz, 1971). Das neue Verfahren führte dazu, dass es möglich wurde, größere Massen von Schienen herzustellen, was für eine rein durch Schienen durchgeführte kieferorthopädische Behandlung, unabdinglich ist (Kesling, 1945).

Sergl entwickelte 1989 eine etwas abgewandelte Form eines Aktivators, der sich an Keslings Positioner orientierte, den bimaxillären Idealisator. Auch er wurde auf einem nach dem Set-Up ausgerichteten Modell hergestellt. Der Autor führt an, dass aufgrund des weichen Materials, aus dem diese Apparatur hergestellt wurde, ein höherer Tragekomfort gewährleistet werden könne. Die Frontzähne wurden hierbei mit einem Labialbogen gefasst, was zu einer Verminderung der Lippenwölbung führte, die zuvor durch die Schiene häufig entstanden und bei den Patienten als unangenehm empfunden wurden. Die Tatsache, dass die bukkalen Flächen der Zähne nicht gefasst wurden, sieht er als einen der wenigen Nachteile seines Gerätes, da so bukkale- orale Bewegungen nur schwer kontrolliert werden konnten (Sergl, 1989).

Anfang der Neunziger wurde mit sogenannten Essix-Retainern, die sich über die Unterkieferfront erstreckten, eine ästhetische Alternative zu den herkömmlichen Retentionsplatten entwickelt (Sheridan et al., 1993). Diese konnten mit Hilfe von kleinen Drahtkonstruktionen oder durch Einfügen spezieller „Divot“ und Fenster innerhalb der Schiene gezielt Zahnbewegungen herbeiführen (Rinchuse und Rinchuse 1997; Sheridan et al., 1994, 1995). Auch hier zeigte sich wieder die hohe Akzeptanz der Patienten gegenüber den Apparaturen aufgrund der lediglich minimalen ästhetischen Veränderungen.

1.3 Invisalign®-System

Da sich der Wunsch nach einer ästhetisch ansprechenden Möglichkeit für Zahnkorrekturen immer weit verbreitete, wurde die Positioner-Behandlung weiter perfektioniert (Brachwitz, 2001). Als größten Nachteil sahen Behandelnde die Tatsache, dass für fast jeden Schritt und damit geplante Zahnbewegung erneut Set-Up-Modelle hergestellt werden mussten. Das 1997 gegründete Unternehmen Align Technology Inc. entwickelte daraufhin eine Therapieplanung, die komplett digital durchgeführt werden kann (Brachwitz und Miethke, 2001). Sie nutzten hierfür aktuelle CAD/CAM-Verfahren, die es ermöglichen, Gipsmodelle der Patientenzahnreihen einzuscannen und anschließend mit ihrer Software zu verändern. Dies vereinfachte die kieferorthopädische Schienenbehandlung wesentlich, da die manuell hergestellten Set-Up-Modelle überflüssig wurden

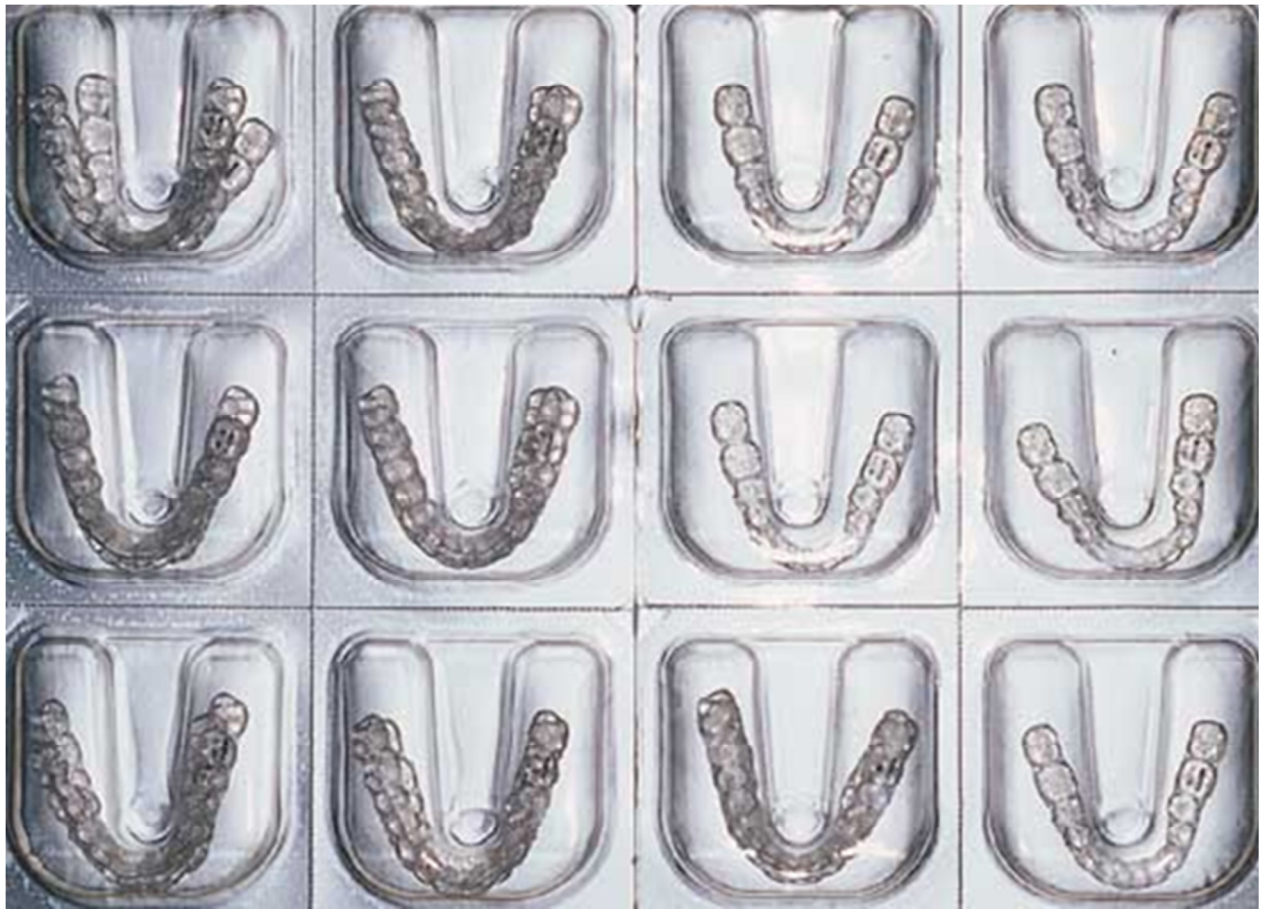


Abbildung 5: Teil eines Aligner-Satzes mit Schienen für den Ober- und Unterkiefer, der dem Behandelnden zugeschickt wird (Vlaskalic et al., 2001).

(Boyd und Waskalic, 2001; Brachwitz und Miethke, 2001). Das Invisalign®-Konzept arbeitet stattdessen mit stereolithographischen Kunststoffmodellen, die nach dem Vorbild der einzelnen, in der Software entstandenen Zwischenschritte, hergestellt werden. Anschließend wird mit dem herkömmlichen Tiefziehverfahren der Aligner hergestellt. Hierzu werden von Align Technology Inc. eigens entwickelte, thermoplastische Kunststoffe verwendet, die mittels Biostar-Geräten (Biostar pressure molding machine, Great Lakes Orthodontic Products, Tonawanda, NY) in Form gebracht werden (Wong, 2002). Um Verwechslungen zu vermeiden, werden in die Okklusalfächen der Aligner die Initialen des Patienten, Alignernummer und Kieferbezeichnung eingelasert, ehe der Schienensatz, wie zum Beispiel in Abbildung 5 zu erkennen, an den behandelnden Kieferorthopäden versandt wird. Ein typischer Schienensatz beinhaltet etwa 25 Aligner, allerdings kann dies auch zwischen zehn und 50 Alignern schwanken, je nach Art der zu behan-

delnden Malokklusion (Joffe, 2003). Jeder Aligner hat die Möglichkeit eine Zahnbewegung von 0,25 bis 0,3 mm bzw. 2° durchzuführen (Phan, 2007).

1.3.1 Behandlungsablauf in der Praxis

Sobald sich der Patient für eine kieferorthopädische Behandlung mit dem Invisalign®-System entschieden hat, müssen sowohl Abdrücke als auch Bissregistrare, Fernröntgenseitenbilder, Orthopantomogramme und Fotos an Align Technology Inc. geschickt werden. Die Abdrücke sollen mit einem Polyvenylsiloxan durchgeführt werden, woraufhin früher die ausgegossenen Modelle zum Firmensitz in Kalifornien geschickt werden mussten. Dort wurden die Gipsmodelle durch einen destruktiven Scanner digitalisiert (Melkos, 2005; Wong, 2002). Es ist zu erwähnen, dass approximale Schmelzreduktionen bei Engständen am besten vor der Abformung durchgeführt werden sollten (Vlaskalic et al., 2001). Neben dieser veralteten Vorgehensweise besteht die Möglichkeit, einen Abdruck durch ein Verfahren ähnlich der Computertomographie zu digitalisieren (Brachwitz und Miethke, 2001; Melkos, 2005; Vlaskalic et al., 2001; Wong, 2002). Mit Einführung des intraoralen Scanners gelang es, auch die Abdrucknahme zu digitalisieren. Align Technology Inc. nutzte den eigens entwickelten Intraoralscanner Itero® um das Verfahren zu verbessern (Garino und Garino, 2011). Sobald Align Technology Inc. die digitalen Modelle der Anfangssituation zur Verfügung stehen, werden sie durch den „virtual orthodontic technician“ (VOT) mit einer Software bearbeitet. Die einzelnen Zähne werden segmentiert und können nun schrittweise in die gewünschte Position verschoben werden (Wong, 2002). Das Behandlungskonzept mit den digitalen Modellen und Zwischenschritten kann nun über die ClinCheck®-Software (Abbildung 6) im Internet durch den behandelnden Zahnarzt begutachtet und gegebenenfalls noch geändert werden, ehe die Produktion der Schienen beginnt (Joffe, 2003).

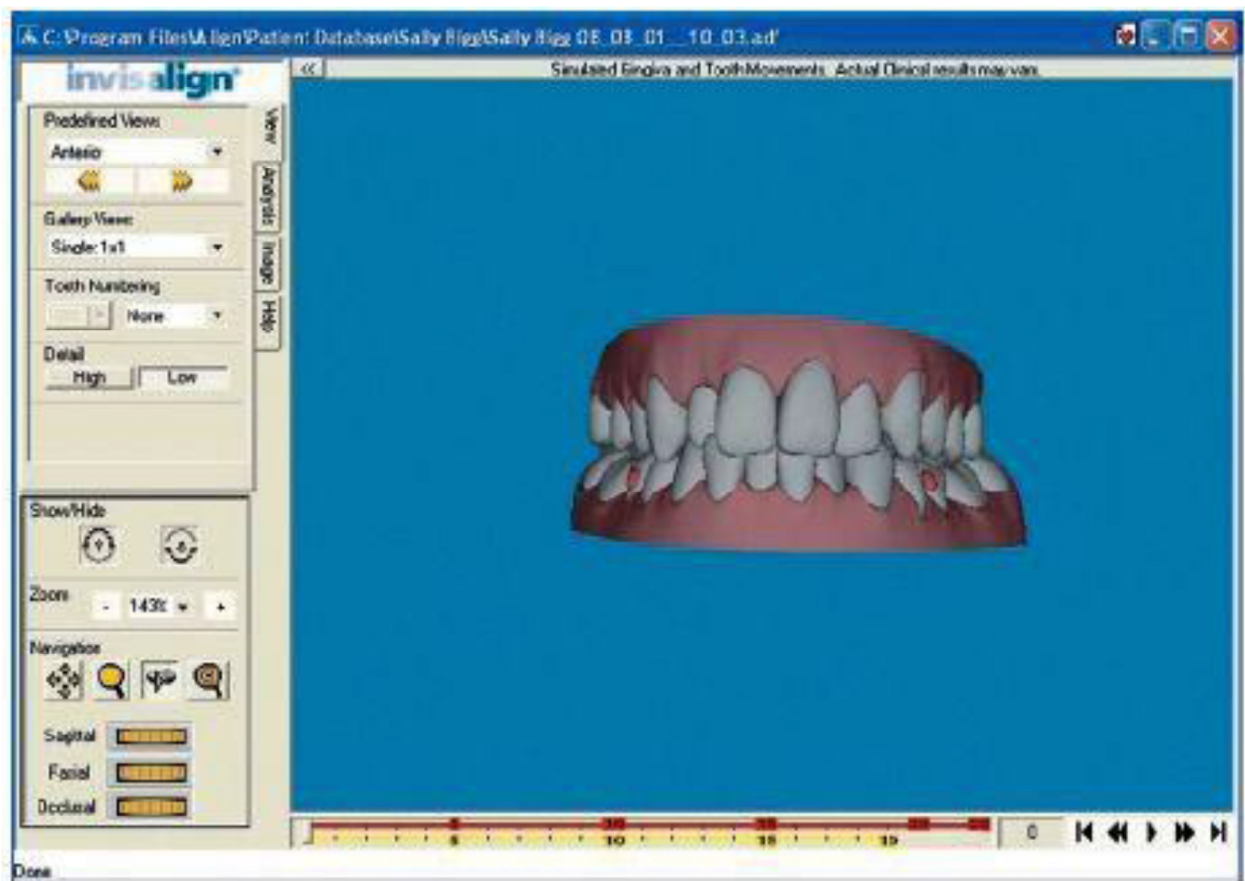


Abbildung 6: Digitales Patientenmodell in der ClinCheck®-Software (Joffe, 2003).

Etwa vier Wochen nach Bestätigung erreicht der Schienensatz die Praxis des Behandelnden. Dort wird die erste Schiene im Patientenmund anprobiert und kontrolliert. In diesem Zusammenhang wird der Patient noch einmal darauf hingewiesen, dass die Tragedauer nicht unter 20 Stunden täglich betragen sollte. Die Schiene darf lediglich zum Essen und zur Mundhygiene heraus genommen werden (Boyd et al., 2000). Das Reinigen der Zähne nach dem Essen und vor dem Einsetzen der Schiene ist zur Kariesprävention unabdinglich, da die natürliche Reinigung durch Zunge und Speichelfluss verhindert wird (Moshiri et al., 2013).

Zwei Wochen nach dem Einsetzen der ersten Schienen wird der Patient erneut einbestellt, damit der Trageverlauf kontrolliert und gegebenenfalls bereits die zweite Schiene eingegliedert werden kann. Sollte die Compliance gut sein, so kann ihm der darauffolgende Aligner zum eigenständigen Wechsel in zwei Wochen mitgegeben werden. Die empfohlene Tragedauer von zwei Wochen kann so eingehalten werden (Bollen et al.,

2003; Drake et al., 2012; Engelke, 2010; Joffe, 2003). Der Patient kann nun alle vier Wochen zum Kontrolltermin erscheinen, um weitere Aligner zu erhalten. Es ist dabei durchaus möglich, dass in den ersten zwei bis drei Tagen nach Einsetzen einer neuen Schiene Schmerzen aufgrund der Zahnbewegungen auftreten (Nedwed und Miethke, 2005). Miller et al. (2007) zeigten allerdings in ihrer Studie, dass die Schmerzen geringer erschienen als bei anderen festsitzenden Apparaturen. In einer anderen Studie empfanden die Patienten die Schmerzen in den ersten Tagen stärker als bei den festsitzenden Apparaturen, doch nehmen sie auch in diesem Falle zwei bis drei Tage später wieder ab (Shalish et al., 2012).

Der Einfluss auf den Behandlungsablauf durch den Behandler während einer laufenden kieferorthopädischen Aligner-Therapie scheint nur bedingt möglich (McKenna, 2001). Deshalb ist es umso wichtiger, dass die Patienten zu regelmäßigen Kontrollen erscheinen. So kann frühzeitig erkannt werden, ob die Aligner korrekt anliegen oder ob gegebenenfalls die Tagedauer einzelner Aligner verändert werden muss (Womack, 2006).

Sollte der Behandelnde feststellen, dass nach dem letzten Behandlungsschritt noch nicht das gewünschte Ziel erreicht wurde, besteht die Möglichkeit eines sogenannten „Case Refirment“. Hierbei werden weitere Aligner zur Verfügung gestellt, um das geplante Behandlungsziel möglichst genau zu realisieren.

Sobald die Aligner nicht mehr passgenau über den Zahnreihen liegen, müssen neue Abdrücke genommen und neue Schienen hergestellt werden. Diese Wiederaufnahme des Falles wird, wie der Hersteller in seinen Geschäftsbedingungen angibt, als „Mid-Course-Correction“ bezeichnet. Dies kann beispielsweise nach dentalen Restaurationen während der kieferorthopädischen Behandlung notwendig sein oder wenn der klinische Verlauf so stark vom geplanten Ablauf abweicht, dass die Aligner nicht mehr über die Zahnreihen passen.

1.3.2 Invisalign®-Teen

Das Invisalign-System umfasste zuerst nur erwachsene Patienten oder jugendlichen Patienten mit vollständiger Dentition (Boyd et al., 2000). Das Wachstum kann eine kieferorthopädische Behandlung allerdings positiv unterstützen. Daher ist es wünschenswert, die Aligner-Behandlung auch schon bei durchbrechenden Zähnen durchführen zu können (Kahl-Nieke, 2010). Auf dieser Grundlage entwickelte Align Technology Inc. 2009 ein Therapiekonzept, das vor allem durchbrechende, bleibende Zähne und Milchzähne mit beachtet: „Invisalign®-Teen“. Hier werden Kompensatoren eingesetzt, die das Durchbrechen der Eckzähne und zweiten Prämolaren sowie zweiten Molaren ermöglichen. Desweiteren bietet das System sechs kostenlose Ersatz-Aligner, die bei Verlust einer Schiene nachbestellt werden können. Die Aligner dieses Systems weisen blaue Indikatorpunkte auf, die bei verlängerter Tragedauer aufgrund des Mundmilieus verblasen (Abbildung 7). Es zeigt dem Behandler und Patienten unterstützend an, wann ein

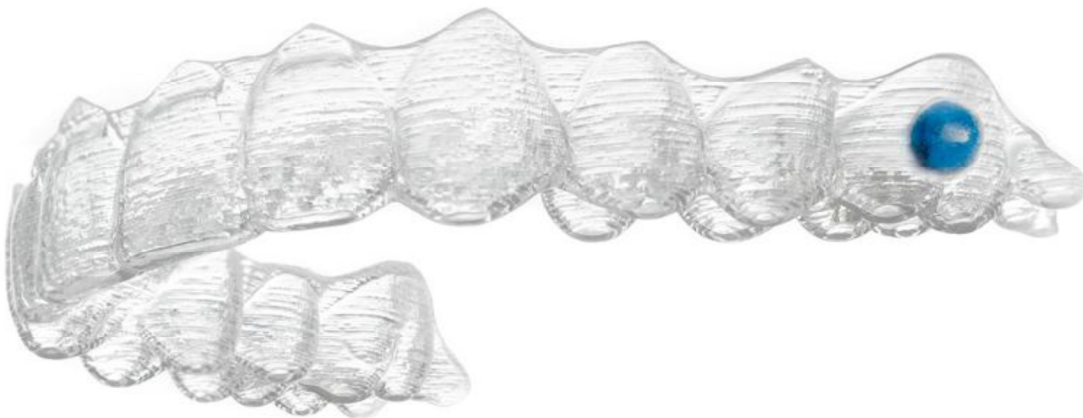


Abbildung 7: Invisalign®-Teen-Aligner mit blauem Indikatorpunkt (Invisalign®, URL: <http://www.invisalign.de/de/what-is-invisalign/Pages/Teen-Braces.aspx>).

neuer Aligner eingesetzt werden muss. Dies kann durchaus auch einen positiven Effekt auf die Compliance des Patienten bewirken, wenn auch der Indikatorpunkt nicht ganz frei von Manipulationsmöglichkeiten ist (Schott und Göz, 2011; Tuncay et al., 2009).

1.4 Behandlungsspektrum und Effektivität von Invisalign®

Es sind nur wenige Literaturnachweise über die Effektivität der Invisalign®-Behandlung aufzufinden. Vor allem durch Erfahrungsberichte einzelner Patientenfälle wird das Behandlungsspektrum der Therapie festgelegt. Die Behandler beschreiben hierbei ihre visuell festgestellten Behandlungserfolge.

Boyd et al. beschrieben 2000, es seien Korrekturen von milden und moderaten Lücken- und Engständen durchführbar. Erfahrene Behandler seien allerdings auch in der Lage, dentale Expansionen, Klasse II- und III-Behandlungen sowie Behandlungen nach Extraktionen durchzuführen (Boyd et al., 2000). Miller et al. (2002) zeigten anhand eines „Case-Report“, dass ein Extraktionslückenschluss im Frontzahnbereich durch die Schienen erfolgen kann. Eine erhöhte Kippung der Zahnkronen führten sie auf die hohe geplante Bewegung von bis zu 0,38 mm pro Aligner zurück, die fast 0,1 mm über der empfohlenen Größe lag.

Auch Joffe bestätigte 2003, dass bis hin zu moderaten Lücken und Engständen Fehlstellungen von 1 bis 5 mm gut korrigiert werden können. Bei Engständen sollten interdentale Schmelzreduktionen oder Extraktionen unterer Schneidezähne unterstützend angewandt werden. Des Weiteren sei es kein Problem, tiefe Überbisse durch Intrusion der Schneidezähne zu korrigieren. Auch die Erweiterung von zu schmalen Kiefern erscheint ohne zu starkes Kippen der Zähne erfolgreich zu sein (Joffe, 2003). Dagegen seien Behebungen von Eng- und Lückenständen über 5 mm sowie Rotationen, die mehr als 20° betragen nur schwer durchführbar. Eine Einstellung der zentrischen Okklusion sowie Korrektur eines offenen Bisses seien ebenfalls nur bedingt durchzuführen. Gleiches gilt sowohl für die Extrusion und Aufrichtung von Zähnen als auch die Behandlung von Zahnbögen mit mehreren fehlenden Zähnen und geringer Zahnkronenhöhe. Zu den Nachteilen zählt Joffe die geringe Kontrolle über Wurzelbewegungen, den geringen Einfluss auf intermaxilläre Gegebenheiten und die geringe Möglichkeit des Behandlers, während der Behandlung eingreifen zu können (Joffe, 2003).

In einer klinischen Studie von Bollen et. al. (2003), bei der es um die Tragedauer von Alignern ging, wurde festgestellt, dass der Lückenschluss nach Extraktion hauptsächlich

durch Kippung erfolgt. Dieses Ergebnis lässt ebenfalls auf eine geringe Kontrolle der Wurzelbewegungen schließen. Auch sie sahen das Erreichen eines guten Ergebnisses als problematischer an, sobald eine höhere Extraktionsanzahl pro Kiefer vorliegt (Bollen et al., 2003). Dass, trotz vier Extraktionen der Prämolaren ein gutes Ergebnis erzielt werden kann, zeigte Womack (2006) anhand eines Patientenfalls. Er zeigte diesbezüglich wieder Probleme bei der Wurzelbewegung auf, die mit Hilfe eines Refinements reduziert werden können (Womack, 2006).

Im selben Jahr veröffentlichten Boyd et al. (2006) Daten zu sechs Patientenfällen. Das Kippen und Rotieren der Schneidezähne sowie Lückenreduktion wurden hier als anfängliche Bewegungen angegeben. Doch auch komplexere Bewegungen seien möglich. Sie wendeten partiell festsitzende Apparaturen an, um eine Wurzelbewegung bei großen Malokklusionen zu erzeugen. Allerdings wiesen sie auch auf dickere Aligner hin, die bei Prämolarenextraktionen ein Kippen der Nachbarzähne bis maximal 10° Grad erreichen konnten. Dentale Kreuzbisse und Overjets bis 13 mm mit Prämolarenextraktion sind bei diesen Fällen, genauso wie tiefe Überbisse durchaus gut behandelbar (Boyd et al., 2006). Auch weitere zwei Jahre später beschrieb er in drei Patientenfällen, dass Engstände bis 6 mm, Tiefbisse sowie Klasse II-Korrekturen gut durchführbar sind. Er wies noch einmal darauf hin, dass eine genaue Diagnostik die Ergebnisse deutlich verbessert (Boyd, 2008). Giancotti et al. bestätigt diese Ergebnisse in einer 2008 erhobenen Studie.

Die genaue Untersuchung von geplantem Ziel und tatsächlich erreichter Zahnbewegung führten Kravitz et al. (2009) durch. Es wurden von 37 Invisalign®-Patienten die ausgeführten Bewegungen der Frontzähne betrachtet. Genutzt wurde hierfür die Software ThoothMeasure® von Align Technology Inc., mit deren Hilfe Messungen eingescannter Modelle vorgenommen werden können. Die eingescannten klinischen Modelle, die die Situation nach Behandlungsschluss wiedergeben, wurden hier anhand von ausgewählten Referenzpunkten auf die ClinCheck®-Daten ausgerichtet. Die Ausrichtungspunkte können unbewegte Zähne, Implantate oder Gaumenfalten sein. Die Genauigkeit dieser Messungen beträgt etwa 0,2 mm und 1° (Kravitz et al., 2009). Die Ergebnisse zeigten, dass 41 % der gesamten Bewegungen erreicht wurden. Den höchsten Erfolg zeigte mit 47 % die geplante Verkleinerung des Zahnbogens, wobei die UK-Canini die höchste Effektivität mit 59 % erreichten. Den geringsten Erfolg erreichte die Extrusionsbewegung

mit einer Effektivität von nur 30 %. Die Zahnkipfung nach lingual scheint demnach besser zu funktionieren als in die labiale Richtung. Es wird darauf hingewiesen, dass die Größe des Overjets Einfluss auf die Genauigkeit der Bewegung hat. Des Weiteren erscheinen keine signifikanten Unterschiede bei den Effektivitäten der gleichen Zahngruppen im Oberkiefer und Unterkiefer (Kravitz et al., 2009).

Giancotti und Farina zeigen 2010 anhand von drei Patientenfällen, dass Lückenreduktionen und Erweiterungen von Implantatlücken durch Kippung möglich sind und unterstützen so die Untersuchungsergebnisse ihrer Kollegen Bollen et al. (2003) und Boyd et al. (2006) Aussagen. Zusätzlich wurde dies 2013 noch einmal von Mampieri und Giancotti bestärkt. In beiden Studien von Giancotti wurde besonderes auf die parodontalen Verhältnisse der Patienten geachtet und kaum negative Veränderungen festgestellt.

In zwei Fallberichten zeigten Schupp et al. (2010a), dass offene Bisse, mit besonderer Beachtung der Zungenverhältnisse, gut behoben werden können. Dies wurde 2013 von Guarneri et. al. an den Beispielen vier weiterer Patienten ebenfalls gezeigt. Offene Bisse bis zu vier Millimetern und moderate Engstände seien gut zu beheben.

Eine Korrektur der Klasse II ist laut den Ergebnissen der Untersuchungen von Schupp et al. (2010b) nur mit Hilfe sogenannter Elastics durchführbar. Diese zusätzlichen Hilfsmittel sind Gummibänder, die zwischen OK- und UK-Zähnen gespannt werden. Hierzu werden spezielle Haken an die entsprechenden Zähne appliziert.

Eine weitere Studie zur Effektivität stellten Krieger et al. 2011 vor. Hier wurden Modelle von 35 Patienten mit Hilfe einer elektrischen Schieblehre vermessen. Auch hier wendete man, wie in der Untersuchung von Kravitz et al. (2009), die ToothMeasure[®] Software an, um die ClinCheck[®]-Daten zu analysieren. Beim Vergleich der ClinCheck[®]-Daten von Behandlungsbeginn und der klinischen Anfangsmodelle zeigten sich nur minimale Abweichungen, weswegen von einer genauen Digitalisierung ausgegangen werden kann. Es wurden dagegen größere Abweichungen zwischen der klinischen Situation nach der Behandlung und dem geplanten ClinCheck[®]-Behandlungsziel festgestellt. Die größten Abweichungen traten bei der Behandlung von Overbite auf. Hier wird nur eine Übereinstimmung von 14,3 % erreicht. Diese geringe Übereinstimmung kann entweder aufgrund ungenauer Messungen mittels Schieblehre entstehen, oder aufgrund von In- und Extrusionen.

sionsproblematiken, die auch schon von Kravitz (Kravitz et al., 2009) aufgelistet wurden. Die Autoren empfahlen „case refirment“ und Überkorrekturen für die In- und Extrusionsbewegungen einzuplanen sowie Attachments und Gummizüge zu verwenden (Krieger et al., 2011). Diese Aussagen wurden auch von der darauffolgenden Studie unterstützt (Krieger et al., 2012). Auch größere Engstände von 5,4 mm im Mittel seien gut voraussehbar.

Im Bereich der Dauer und Zeitintensität der Behandlung führten Buschang et al. im Jahre 2013 eine Studie durch. Hierbei verglich man 150 Aligner-Behandlungen an Patienten, welche Engstände kleiner bzw. gleich 5 mm und keine Extraktionsbefunde aufwiesen, mit konventionellen Patienten-Behandlungen. Es stellte sich heraus, dass die Aligner-Therapie 67 % schneller durchgeführt werden konnte als die Behandlung mit konventionellen Brackets. Trotzdem sollte beachtet werden, dass bei unerfahrenen Behandlern ein höherer Zeitaufwand nötig ist. Auch die Materialkosten seien bei der Aligner-Therapie höher (Buschang et al., 2013).

1.5 Biomechanik

Kieferorthopädische Zahnbewegungen sind abhängig von der Kraft F , dem zahnabhängigen Widerstandszentrum WZ und dem daraus resultierenden Rotationszentrum RZ (Schopf, 2008). Das Widerstandszentrum ist analog zum Schwerpunkt eines starren Körpers zu sehen und ist abhängig von der Wurzelgröße, Anzahl der Wurzeln, Höhe des Attachments, der Dicke und Qualität der Bindegewebsmanschette, der Beschaffenheit und Dicke des Parodontalligaments. Bei einem einwurzeligen Zahn liegt dieses etwa am Übergang vom zervikalen und mittleren Drittel, bei mehrwurzeligen Zähnen ca. 1 mm bis 2 mm apikal der Furkation (Sander et al., 2011).

Vier Bewegungskombinationen haben in der Kieferorthopädie eine besondere Bedeutung: (1) Translation, (2) Translation, (3) kontrollierte Kippung und (4) Wurzelbewegung (Torque).

Wird eine einzelne Kraft durch das Widerstandszentrum geleitet, wird der Zahn eine Translationsbewegung durchführen, also eine Parallelverschiebung der Zahnachse. Das Rotationszentrum liegt hierbei im Unendlichen. Aufgrund der anatomischen Gegebenheiten kann der Kraftangriff meistens nicht direkt am Widerstandszentrum erfolgen. Es bedarf zusätzlich zur an der Krone applizierten Kraft eines Drehmoments M . Dieses berechnet sich aus Kraft und Abstand zum Widerstandszentrum:

$$M = F \times \text{Abstand.}$$

Durch die Position des Brackets, das nach generellen Setzregeln appliziert wird, kann von einem mehr oder weniger festgelegten Abstand ausgegangen werden. Stehen nun Kraft und Drehmoment im richtigen Verhältnis zueinander, so wird eine körperliche Bewegung erreicht (Kahl-Nieke, 1995; Sander et al., 2011).

Sobald zwei entgegengesetzte Kräfte auf den Zahn einwirken, also eine Gegenkraft zur Kompensation einsetzt, wird eine Rotation um das Widerstandszentrum erreicht. Man spricht hierbei von einer unkontrollierten Kippung. Erfolgt der Kraftangriff inzisal vom Widerstandszentrum, so findet sich das Rotationszentrum im Apex. Die erfolgte Kippung wird kontrollierte Kippung genannt. Befindet sich das Rotationszentrum in der Kronenspitze, so wird eine reine Wurzelbewegung durchgeführt (Kahl-Nieke, 1995).

2. Fragestellung und Ziele

Wie bereits in der Einführung aufgegriffen, ist eine ästhetisch unauffällige Schienentherapie ein immer häufiger auftretender Patientenwunsch. Es stellt sich die Frage, ob unter Zuhilfenahme von zum Beispiel Attachments, die gewünschten und geplanten Bewegungen tatsächlich durchgeführt werden können.

In der folgenden Arbeit sollte computergestützt geprüft werden, ob das digital geplante Behandlungsziel klinisch auch erreicht werden kann. Die im Vergleich von geplanter und klinisch stattgefundener Bewegung ermittelte Effektivität lässt auf folgende Fragen Antworten finden:

- Welche Bewegungen sind für welche Zahntypen gut durchführbar?
- Unterscheiden sich die Ergebnisse der mit Invisalign®-Teen behandelten Patientendaten mit denen der herkömmlichen Variante?
- Unterscheidet sich die Effektivität der Zahnbewegungen des Oberkiefers zu denen des Unterkiefers oder ist sie abhängig von der Wurzelanzahl?
- Lassen sich die ermittelten Ergebnisse zur Effektivität für eine Optimierung der Behandlungsplanung verwenden?

3. Material und Methode

Als Datengrundlage standen dieser retrospektiven Arbeit Daten und klinische Modelle von zwei verschiedenen Patientengruppen, die von zwei unterschiedlichen Behandlern mit Invisalign® behandelt wurden, zur Verfügung. Die eine Patientengruppe A bestand aus 18 erwachsenen Patienten. Die zweite Gruppe T bestand aus 17 jugendlichen Patienten, die mittels Invisalign®-Teen im Zeitraum von 2009 bis 2012 behandelt wurden. Beide Gruppen wurden mit dem gleichen Aligner-Material, EX 30, therapiert. Es lagen von den 18 erwachsenen Patienten je ein Gipsmodell des Ober- (OK) und Unterkiefers (UK) vor Behandlungsbeginn und nach Behandlungsabschluss vor. Die dazu passenden digitalen Dateien (ClinCheck®, C), die das geplante Behandlungsziel beinhalten, wurden von Align Technology Inc. zu Verfügung gestellt. Durch die zweite Gruppe mit jugendlichen Patienten standen weitere 17 digitalisierte OK- und UK-Modelle von Behandlungsbeginn und nach Behandlungsschluss sowie deren digitale Behandlungsziele (ClinCheck®) zur Verfügung. Beide Gruppen wurden mit Invisalign® typischen und empfohlenen zusätzlichen Hilfsmitteln, wie z. B. Attachments, behandelt. Da diese Untersuchung sich auf die Effektivität des gesamten Systems bezieht, wird nicht im Einzelnen auf diese eingegangen. Genauso wird die unterschiedliche Anzahl der für die Behandlung nötigen Aligner nicht explizit beachtet. Das Behandlungsende wurde von den Behandlern während der laufenden Behandlung anhand einer visuellen Kontrolle festgestellt und die entsprechenden ClinChecks® als Behandlungsziel festgelegt.

Um die Effektivität der Behandlungsmethode ermitteln zu können, müssen die korrespondierenden Modelle digital übereinander gelagert und die Bewegungen vermessen werden. Hierfür bedarf es einer Referenzstruktur, an der sich die zu unterschiedlichen Behandlungszeiten befindenden Modelle ausgerichtet werden können. Im OK erscheinen die anatomisch meist unveränderten Gaumenfalten als gute Referenzpunkte (Almeida et al., 1995; Hoggan und Sadowsky, 2001). Da eine solche anatomische Referenzstruktur im UK allerdings nicht vorhanden ist, muss diesbezüglich die Ausrichtung auf nicht bewegte Zähne erfolgen. Hauschopp (2012) hat verschiedene Auswertungsmethoden untereinander verglichen und diese als am besten geeignete herausgestellt und so in ihrer Arbeit sowohl für den UK als auch für den OK angewendet. Auch der

Vergleich zwischen den virtuellen ClinCheck®-Modellen und den klinischen Modellen kann nicht über die Gaumenfalte als Referenzpunkt verlaufen, da die Gaumenpartie im OK im ClinCheck®-Modell komplett ausgespart wird (Abbildung 8). Im virtuellen Behandlungsziel werden die einzelnen Zähne nach der Abbildung der Patientenzähne selektiert und in eine neue Modellbasis eingesetzt. Diese Modellbasis entspricht nicht den anatomischen Gegebenheiten der Patienten, weswegen eine Überlagerung der nicht bewegten Zähne unabdinglich ist.

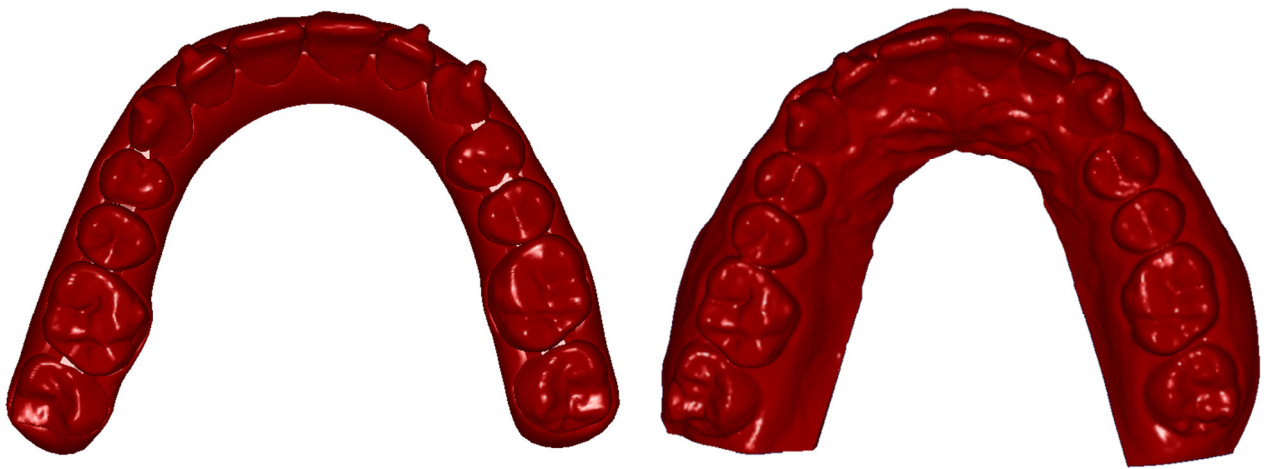


Abbildung 8: Links das ClinCheck®-OK-Modell ohne anatomische Referenzstrukturen; rechts finales OK-Modell des gleichen Patienten mit Rugae Palatinae.

3.1 Auswahl der Modelle

Im ClinCheck®-Programm wird visuell dargestellt, welche Zähne laut Planung unbewegt bleiben. Diese Information ermöglicht es, wie im obigen Absatz kurz beschrieben, die Patientenmodelle übereinander zu lagern. Umso wichtiger war es, die Modelle nicht in die Analyse mit einzubeziehen, bei denen geplant war, alle Zähne im Verlauf der Behandlung zu bewegen. Nach dieser Selektion mussten sieben OK und vier UK-Modelle der Erwachsenen-Gruppe A sowie fünf OK- und vier UK-Modelle der Invisalign®-Teen-Gruppe T aus der Datengrundlage ausgeschlossen werden.

Nachdem weitere Modelle aufgrund von Ungenauigkeiten oder Defekte nicht korrekt übereinander gelagert werden konnten, wurden diese ebenfalls von der weiteren Analyse ausgeschlossen.

In die Auswertung wurden somit einbezogen:

- 10 x OK^A ,
- 10 x UK^A ,
- 12 x OK^T und
- 11 x UK^T .

Wie zuvor bereits erwähnt, waren von allen Modellen je drei Ausführungen vorhanden:

- Ein klinisches Anfangsmodell: M_{in} ,
- Ein klinisches Endmodell: M_{fin} und
- Ein virtuell geplantes Behandlungsziel, ClinCheck[®]: C.

3.2 Vorbereitung der Modelle

Die klinischen Modelle von Behandlungsbeginn und -ende der mit Invisalign[®] behandelten Erwachsenengruppe waren als Gipsmodelle vorhanden und wurden mit einem 3D-Laserscanner digitalisiert (micromasure[®] 70, micromasure GmbH, Bischoffen, Deutschland, Abbildung 9). Der hierfür verwendete Scanner nutzt einen optischen Sensor, der nach dem Prinzip der Lichtschnitt-Triangulation berührungslos die Oberfläche des zu scannenden Objekts abtastet (Grobe, 2011). Eine CCD-Kamera (charge-coupled device Kamera) kann das durch die Laserlinien erzeugte Höhenprofil aufnehmen und daraus eine digitale, dreidimensionale Punktwolke erstellen. Das Modell wurde dabei auf einem, über die Software „ScanOs“ gesteuerten, angulierbaren, motorisierten Objektisch fixiert (Abbildung 9). Durch Bewegung des Tisches (Translation, Rotation, Kippung), konnte nun das Modell aus mehreren Winkeln vom Laser erfasst und somit auch unterschneittige Bereiche digitalisiert werden.

Um eine ausreichende Modellübersicht zu erreichen, wurde jedes Modell aus vier verschiedenen Perspektiven aufgenommen. Die entstandene Punktwolke ist mit Hilfe einer „Lasso“-Funktion auf den Bereich der Zähne und des Zahnfleisches reduziert worden, sodass über das Modell hinausragende Oberflächen entfernt wurden. Anschließend wurden die verschiedenen Punkte-Wolken des einzelnen Modells zu einer Oberfläche zusammengelagert und die erhaltene Datei zu einer ASCII-Text-Datei exportiert. Die Genauigkeit des Laserscanners ist vom CCD-Chip der Kamera abhängig. In diesem Fall betragen die Abstände zwischen den Laserlinien laut Hersteller $53\text{ }\mu\text{m}$ in der y-Achse. Der Abstand der Laserlinien in der x-Achse wurde mit $100\text{ }\mu\text{m}$ festgelegt. In der Vertikalen sind die Distanzen abhängig von der Modelloberfläche sowie dem Winkel der Projektion zum Messtisch.

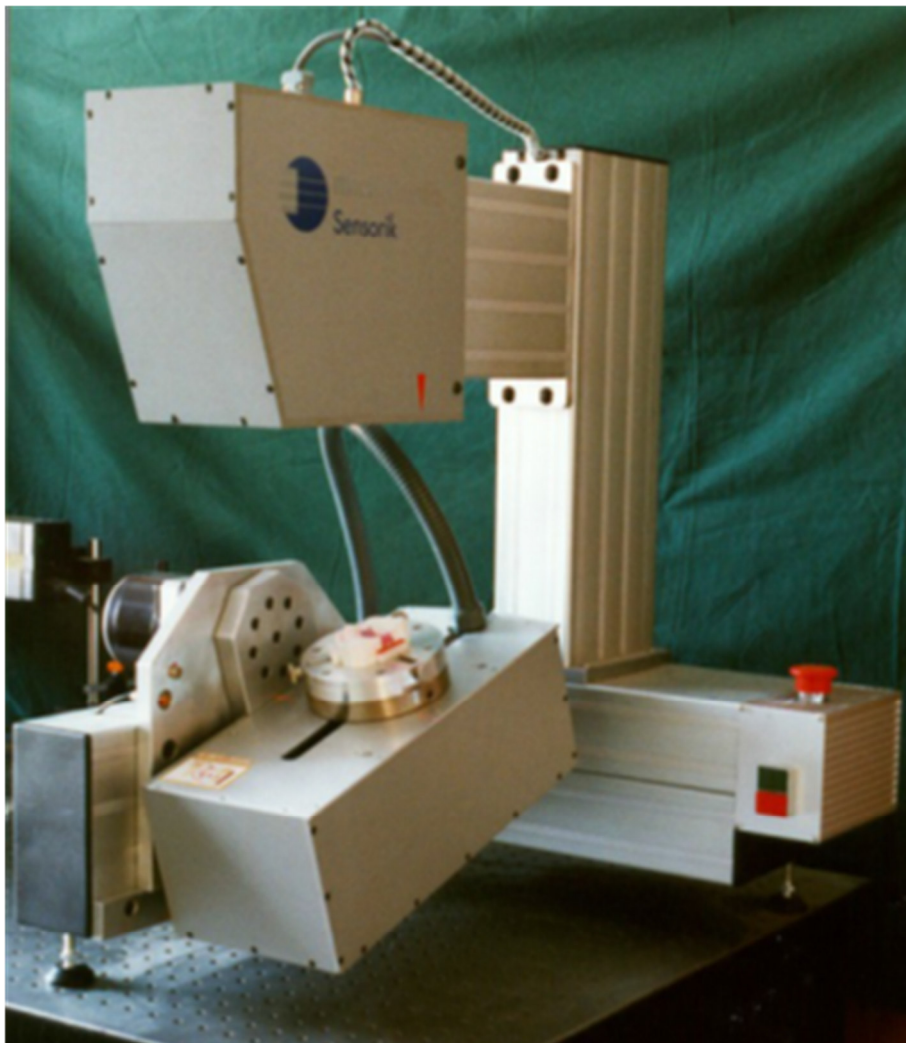


Abbildung 9: 3D-Laserscanner mit angulierbarem Objektisch (Grobe, 2011).

Die von Align Technology Inc. erhaltenen ClinCheck®-Dateien lagen im STL-Format vor und enthielten sowohl Daten des OK als auch des UK. Um diese aufzutrennen und in je einer Datei speichern zu können, wurde das Programm ReMESH (Version 2.1, Autor: Marco Attene, Italien) verwendet.

3.3 Ausrichten der Modelle

Sowohl die ClinCheck®- als auch die eingescannten Modelle wurden mit Hilfe einer speziellen 3D-Graphik-Software visualisiert und bearbeitet (Surfacer 10.5, Image-ware/Siemens PLM Software, Plano, Texas, USA). Hierbei wurden die einzelnen Zähne aus der Punkteoberfläche segmentiert und dupliziert, sodass am Ende je eine komplette Modelloberfläche mit Zahnkranz und separaten Zahnoberflächen jedes Zahns vorhanden waren. Es ist zu beachten, dass die Bewegungen des zweiten und dritten Molaren nicht analysiert wurden, da sie teilweise nicht vorhanden oder nicht komplett abgeformt worden sind. Die Überlagerung der einzelnen Modelle eines Patienten erfolgte über den sogenannten Surface-Surface-Matching-Algorithmus (Keilig et al., 2003). Hierbei werden die unbewegten Zähne der Endsituation nach dem Prinzip der Abstandsminimierung auf die Punktwolke der initial unbewegten Zähne gelagert (Abbildung 10). Der restliche Zahnkranz und die Basis folgen dieser Bewegung und die beiden Modelle erhalten so ein gemeinsames Referenzsystem. Das als „Matching“ bezeichnete Verfahren wurde

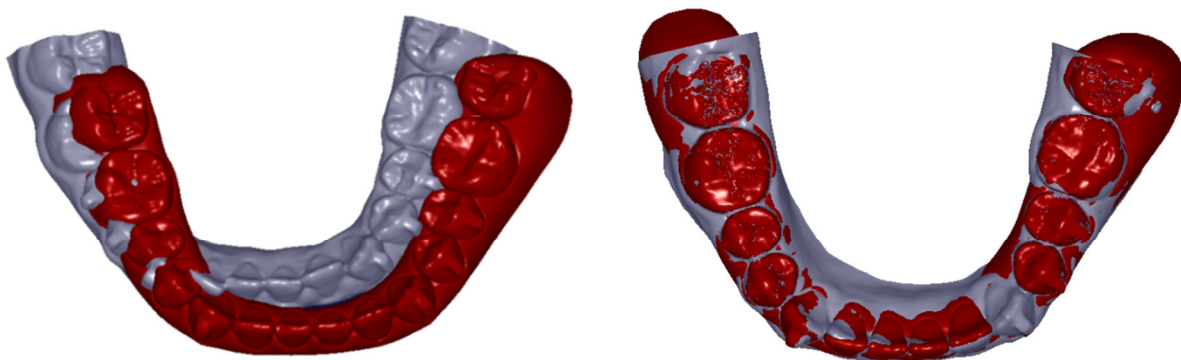


Abbildung 10: ClinCheck® (rot, als Oberfläche dargestellt) und initiales Modell (grau, als Oberfläche dargestellt) vor „Matching“ (links) und nach „Matching“ auf die unbewegten Zähne 34, 35, 36, 44, 45, 46 (rechts).

ebenfalls mit dem virtuellen Behandlungsziel (C) und dem Anfangsmodell (M_{in}) durchgeführt. Auch hier wurde dasselbe Referenzsystem festgelegt, sodass die später gemessenen Bewegungen verglichen werden konnten.

Es wurden somit folgende Überlagerungen durchgeführt:

- Modell M_{fin} auf Modell M_{in} ,
- ClinCheck® C auf Modell M_{in} .

3.4 Einzelzahnbewegungen

Um die Einzelzahnbewegungen beurteilen zu können, wurde erneut eine Überlagerung der Einzelzahn-Punktwolken im Koordinatenursprung durchgeführt. Die tatsächlich durchgeführte Bewegung wird durch das Ausrichten der einzelnen Zähne von M_{in} auf die finale Punktwolke von M_{fin} berechnet (Abbildung 11). Die geplante Bewegung wird dann durch das Überlagern von Einzelzähnen von M_{in} auf C verdeutlicht. Die Differenz der Zahnpositionen gibt Informationen zu sechs Bewegungen: Translationen entlang der

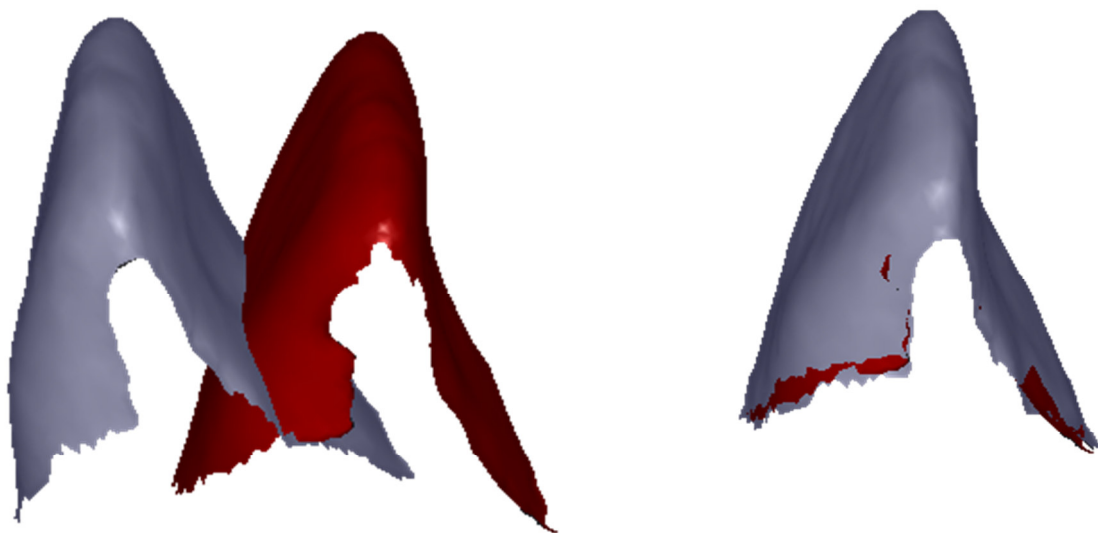


Abbildung 11: links: Punktwolke des Zahn 21, als Oberfläche dargestellt, vor dem Matching. Rechts: Punktwolke des Zahn 21, als Oberfläche dargestellt, nach dem Matching. Grau: initiales Modell (M_{in}); Rot: finales Modell (M_{fin}).

x-, y- und z-Achsen (T_x , T_y , T_z) sowie Rotationen um die x-, y- und z-Achsen (R_x , R_y , R_z). Diese Daten wurden in das Tabellenkalkulationsprogramm Excel 2010 (Microsoft Corporation, Remond, USA) eingegeben. Es ist zu erwähnen, dass die Informationen sich auf die Bewegungen der Zahnkrone beziehen, da die Modelle keinerlei Informationen über die Zahnwurzeln enthalten. Es wurde deshalb nicht zwischen kontrollierter und unkontrollierter Kippung sowie Wurzelbewegung unterschieden (siehe Kapitel 1.5).

3.5 Zahneigenes Koordinatensystem

Um die Messerergebnisse vergleichen zu können, bedarf es für jedes Modell eines rechtshändigen, globalen Koordinatensystems, in dem die Modelle in der Surfacar Software ausgerichtet sind. Da zahnspezifische Bewegungen verglichen werden sollen, muss dieses später in ein zahneigenes Koordinatensystem umgewandelt werden. Hierbei wurde die x-Achse so festgelegt, dass sie Bewegungen in oro-vestibuläre Richtung beschreibt. Die y-Achse zeigt Bewegungen in mesio-distale Richtung an sowie die z-Achsen die In- und Extrusionsbewegung (Abbildung 12). In dieser Arbeit wurde festgelegt, dass positive Kräfte entlang der jeweiligen Achsen eine mesiale oder vestibuläre Bewegung sowie eine Extrusion hervorrufen, angelehnt an die Definition von Burstone und Koenig (Burstone und Koenig, 1974).

3.6 Datenanalyse

Wie in den vorherigen Abschnitten bereits beschrieben, wurden die durch die Überlagerung von Zahnkränzen und die darauf folgenden Einzelzahnüberlagerungen erhaltenen Daten in das Tabellenkalkulationsprogramm Excel eingefügt. Für jeden Einzelzahn wurde anhand der individuell geplanten Bewegung im Vergleich mit der tatsächlich ausgeführten Bewegung die Effektivität ermittelt. Bedingt durch Messungenauigkeiten wurden alle erfassten Werte, bei denen eine Translation unter 0,2 mm und eine Rotation Einzelzähne wurden nach OK und UK sowie nach folgenden Zahntypen sortiert: von unter 2° festgestellt wurden, nicht in die Analyse mit einbezogen. Die Werte der

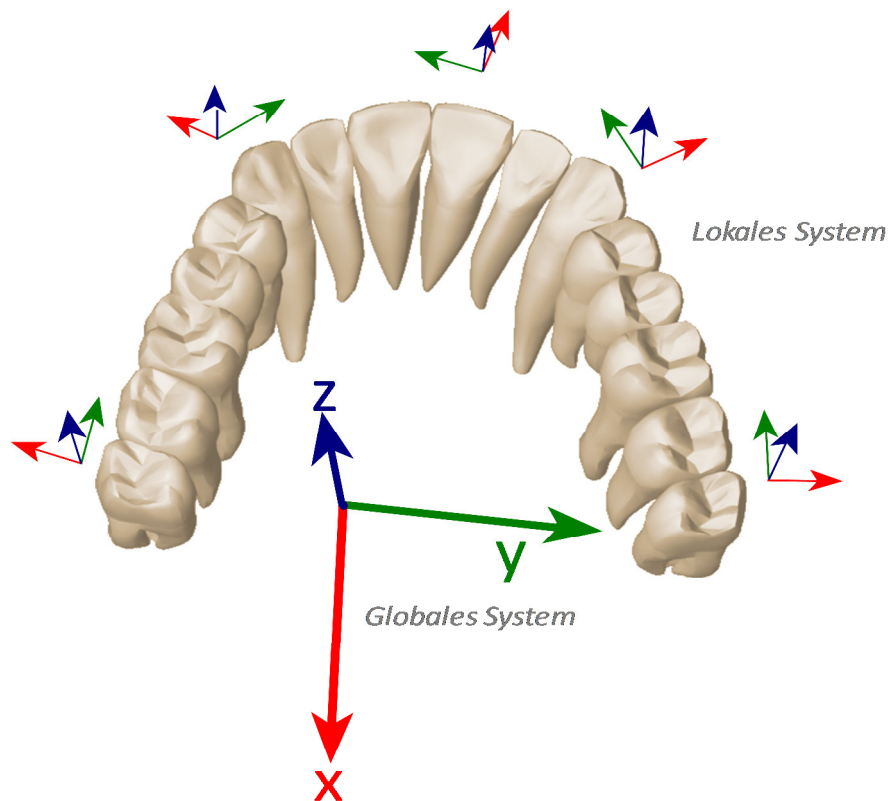


Abbildung 12: Zahnbogen mit globalem Koordinatensystem (groß) und zahneigenem lokalem Koordinatensystem (klein). Bewegungen ,die auf dem zahneigenen Koordinatensystem entlang der x-Achse verlaufen, entsprechen Bewegungen nach mesio-distal, auf der y-Achse nach oro-vestibulär und auf der z-Achse der In- bzw. Extrusionsbewegung.

Inzisivi (1er), zweite Inzisivi (2er), Canini (3er), erste Prämolaren (4er), zweite Prämolaren (5er) und erste Molaren (6er). Hierbei wurde nicht zwischen erstem und zweitem sowie drittem und viertem Quadranten unterschieden. Dies beruht auf der Annahme, dass die Therapie sich auch bedingt durch die identische Zahnmorphologie nicht seitenabhängig unterscheidet. Die Anzahl der Zahnbewegungen pro Zahntyp konnte somit erhöht werden. Anhand der Sortierung nach Zahntypen wurde nun ein Mittelwert der geplanten Bewegung errechnet. Für die weitere Auswertung wurden nur die Bewegungen berücksichtigt, bei denen die Zahnbewegung von mindestens drei Zähnen erfasst wurde.

Es erscheint nicht sinnvoll, die Translationen der Zahnkrone entlang der x-Achse in orale und vestibuläre Bewegungen zu unterscheiden, da die Mechanik sich bei dieser Be-

wegungsrichtung nicht unterscheidet. Gleiches gilt für die Translation entlang der y-Achse sowie bei allen Rotationen. Anders ist es bei der Intrusion und der Extrusion (T_z) des Zahnes. Obwohl hierbei die gleiche Bewegungsrichtung entlang der z-Achse durchgeführt wird, unterscheidet sich die Mechanik deutlich. Die Aligner sind bei der Extrusion eines Zahnes abhängig von Unterschnitten der Zahnkrone oder der Attachments. Die Intrusion erfolgte dagegen meist über die Okklusionsfläche. Des Weiteren wird die Intrusionsbewegung über die Kaukraft, die auf der Okklusionsfläche der Schiene lastet, unterstützt. Im Vergleich dazu muss die Extrusionsbewegung entgegen der Okklusionskräfte durchgeführt werden. Aus diesem Grund, wurde die Bewegung entlang der z-Achse in Intrusion (negative Werte) und Extrusion (positive Werte) selektiert.

3.6.1 Berechnung der gewichteten mittleren relativen Effektivität

Um eine mittlere relative Effektivität e_{rel} der Zahnbewegung zu bestimmen, musste die Effektivität für jeden einzelnen Patientenfall bestimmt werden. In einem Patientenfall wurde die erzielte Zahnbewegung t_{fin} in einer Bewegungsrichtung mit der geplanten Bewegung t_C in dieser Richtung in Relation gesetzt:

$$Effektivität_{rel} = \frac{Bewegung_{final}}{Bewegung_{Clincheck}}.$$

Dabei ist zu berücksichtigen, dass der Fehler des Messverfahrens bei einer geringen angestrebten Zahnbewegung relativ gesehen einen größeren Einfluss hat als bei großen angestrebten Zahnbewegungen. Um den Einfluss dieses Fehlers zu minimieren ist daher die bei Bewegungen über längere Strecken ermittelte Effektivität aussagekräftiger als die aus kleinen Bewegungen ermittelte Effektivität.

Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, wurde daher ein gewichteter Mittelwert verwendet, um aus den Einzeleffektivitäten x_i eine mittlere Effektivität \bar{x} zu bestimmen:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \cdot x_i}{\sum_{i=1}^n w_i}.$$

Als Gewichte w_i wurden dabei die Größe der angestrebten Bewegung verwendet, so dass große Bewegungen mit einem hohen Gewicht und kleine Bewegungen mit einem niedrigen Gewicht berücksichtigt werden konnten.

3.6.2 Statistische Analyse

Nach der tabellarischen Erfassung erfolgte die Prüfung der Werte auf statistische Signifikanz mittels t-Test, mit einem festgelegten Signifikanzniveau von 0,05, im Tabellenkalkulationsprogramm Excel. Zum Ausgleich einer möglichen Alpha-Fehler-Kumulierung wurde eine nachfolgende Korrektur nach Bonferroni-Holm durchgeführt. Zum einen wurde geprüft, ob sich die Effektivität der einzelnen Behandlungsformen T und A statistisch signifikant unterscheidet. Zur Auswertung wurden die Werte der einzelnen Zahntypen und der jeweiligen Bewegungsrichtungen untersucht.

Zum anderen wurde untersucht, ob die unterschiedlichen Zahnkronenmerkmale einen Einfluss auf die Effektivität der Bewegungen haben könnten. Aus diesem Grund wurde die Effektivität verschiedener Zahngruppen eines Kiefers betrachtet und auf signifikante Unterschiede geprüft. Die Zähne wurden anhand ihrer Merkmale in vier Gruppen eingeteilt: Die 1er und 2er jedes Kiefers wurden der Gruppe der Inzisivi zugeteilt und die 4er und 5er zu Prämolaren zusammengefasst. Die Gruppe der Canini besteht durch die Zahnmorphologie bedingt nur aus den 3ern. Da nur die ersten Molaren in die Untersuchungen mit einbezogen wurden, besteht die Gruppe der Molaren ebenfalls nur aus einem Zahntypen.

Des Weiteren wurde untersucht, ob sich durch die unterschiedliche Anzahl der Wurzeln ein signifikanter Unterschied der Effektivität feststellen lässt. Hierzu wurden die Zähne der jeweiligen Kiefer wiederum in mehr- und einwurzelige Zähne aufgeteilt. Daraus re-

sultierte im OK eine Gruppe der mehrwurzligen Zähne aus 4ern und 6ern. Im UK eine Gruppe, die nur aus den 6ern besteht. Die Gruppe der einwurzeligen Zähne besteht im OK aus den 1ern, 2ern, 3ern und 5ern, im UK aus den 1ern, 2ern, 3ern, 4ern und 5ern.

Durch unterschiedliche Knochenbedingungen im OK und UK ist es interessant zu prüfen, ob sich die Effektivitäten der einzelnen Zähne, der Zahngruppen sowie der mehr- und einwurzeligen Zähne im Vergleich von OK zu UK signifikant unterscheiden.

4. Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Untersuchungen in Säulendiagrammen dargestellt und beschrieben. Anhand der Diagramme werden sowohl die mittleren geplanten Bewegungen als auch die mittlere relative Effektivität der einzelnen Zahntypen gezeigt. Jedes Säulendiagramm bezieht sich auf eine Bewegungsrichtung in Form einer Translation oder Rotation entlang einer Achsrichtung. Im Anschluss werden die Ergebnisse der gesamten Patientendaten dargestellt. In den Kapiteln 4.3 und 4.4 werden die Ergebnisse der mit Invisalign® -Teen Patientengruppe T und Erwachsenengruppe A separat betrachtet. Dabei ist zu berücksichtigen, dass durch die Aufteilung in die Gruppen T und A bei vereinzelter Bewegungsrichtungen eine zu geringe Datenanzahl zur Verfügung stand und deshalb nicht bewertet werden konnte. Zuletzt wird eine statistische Auswertung der Analyse in tabellarischer Form aufgeführt.

4.1 Einführung einer Bewertungsskala

Um die sprachliche Auswertung einfacher zu gestalten, wurde eine Bewertungsskala eingeführt (Abbildung 13). Diese orientiert sich an der bereits von Hauschopp (2012) verwendeten Skala zur Interpretation der Untersuchungsergebnisse. Bei Werten zwischen 0 % und 49 % wird von einer Unterkorrektur gesprochen, Werte zwischen 50 % und 69 % sowie 131 % und 150 % werden bei einer sogenannten mäßigen Effektivität erreicht. Eine hohe Effektivität wird bei den Werten zwischen 70 % und 89 % und 111 % und 130 % benannt. Eine sehr hohe Effektivität wird bei Werten zwischen 91 % und 110 % erreicht. Ab 151 % wird von einer Überkorrektur gesprochen.

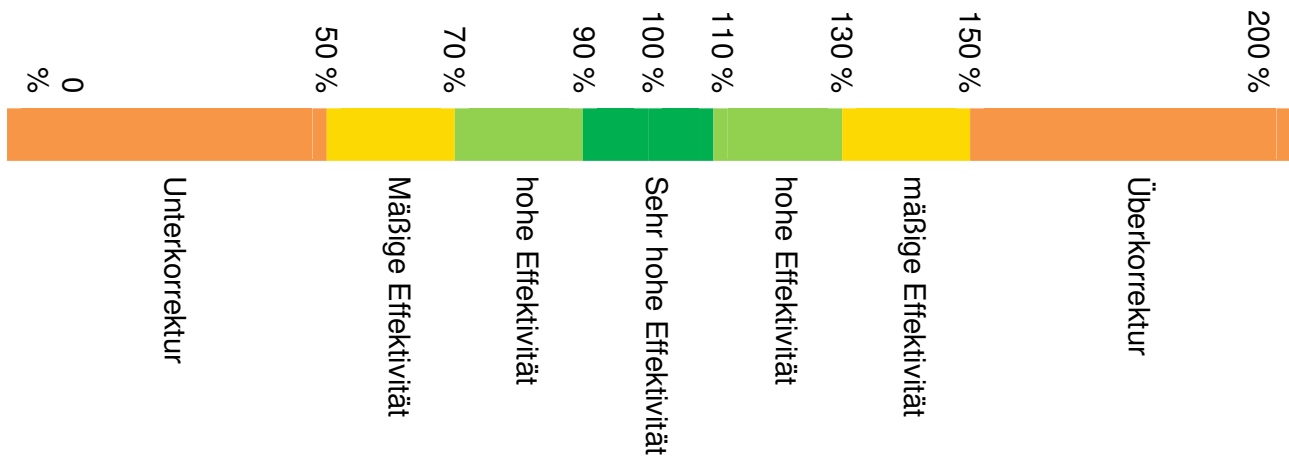


Abbildung 13: Bewertungsskala angelehnt an die von Hauschopp (2012) erarbeitete Skala zur Interpretation der Messergebnisse. Die farbigen Balken entsprechen der mittleren relativen Effektivität mit den daraus resultierenden Deutungen.

4.2 Ergebnisse der gesamten Patientendaten

Im Säulendiagramm der Abbildung 14 wird die erreichte mittlere relative Effektivität in Prozent sowie die entsprechenden Fehler in den oberen Säulen angegeben. Dieser Wert gibt an, wie effektiv die geplante Translationsbewegung in oro-vestibuläre Richtung durchgeführt wurde. Die unteren Säulen entsprechen der ermittelten mittleren geplanten Bewegung in Millimetern sowie der Standardabweichung. Jede Säule steht für einen Zahntypen des OK und UK. Die Anzahl N der verwendeten Datensätze, die für die Bildung der jeweiligen Mittelwerte verwendet wurden, finden sich unterhalb der Zahntypbezeichnungen. Die größten Bewegungen von 1,0 mm und 1,2 mm wurden bei den ersten Inzisivi des OK und UK geplant, wiesen jedoch auch die höchsten Abweichungen auf. Trotzdem sind sowohl kleine als auch größere Bewegungen mit hoher Effektivität durchführbar. Die zweiten Prämolaren des UK zeigten bei ähnlicher mittlerer geplanter Bewegung mit 96 % eine sehr hohe Effektivität. Auch die ersten Prämolaren des UK zeigten mit 93 % bei einer mittleren geplanten Bewegung von 0,7 mm eine sehr hohe Effektivität. Die zweiten Inzisivi beider Kiefer, die Prämolaren des OK sowie die Canini und Molaren des UK zeigten mit Werten zwischen 71 % und 87 %, bei einer mittleren geplanten

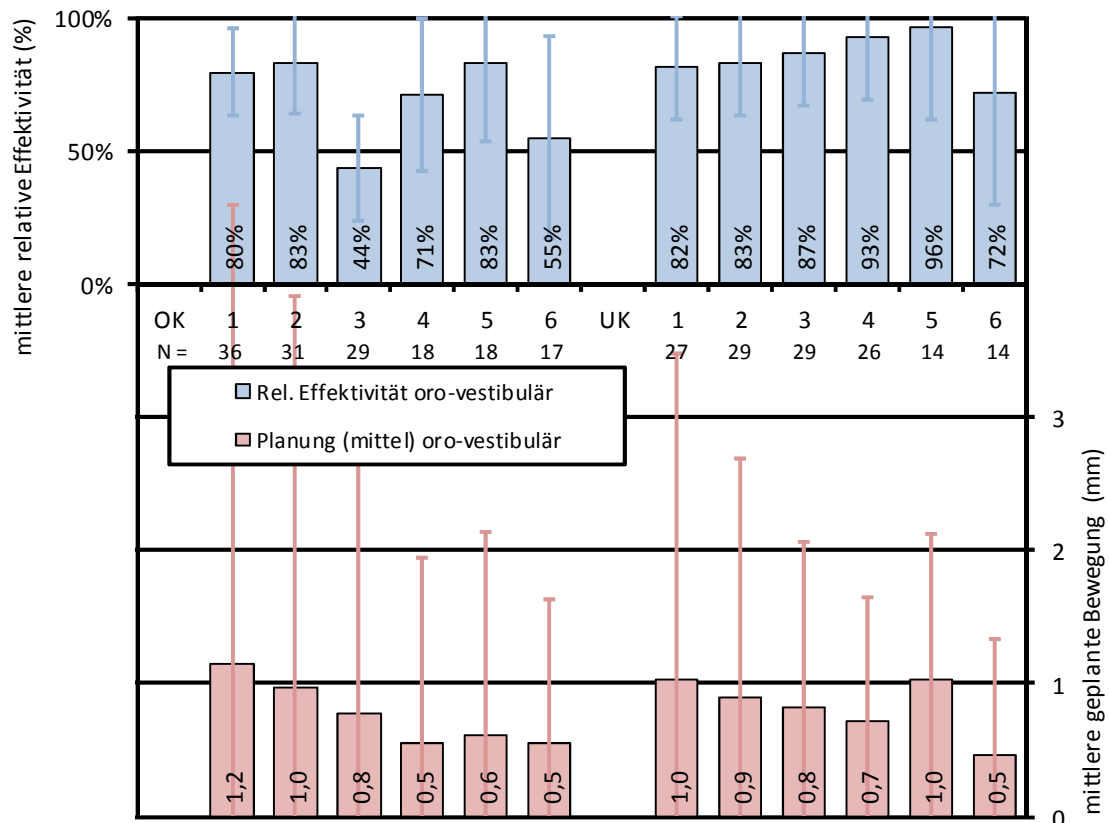


Abbildung 14: Säulendiagramm zur Darstellung der relativen Effektivität der Zahnbewegungen der gesamten Patientendaten. Es zeigt die Bewegungen entlang der x-Achse, d.h. Translationen nach oral oder vestibulär. Die oberen Säulen geben für jeden Zahntypen die relative Effektivität sowie den Fehler in Prozent an. Die unteren Säulen zeigen die mittlere geplante Bewegung in Millimetern sowie die Standardabweichung an. Die Anzahl N der für die jeweiligen Mittelwerte verwendeten Datensätze ist jeweils unterhalb der Zahntypen aufgelistet.

Bewegung von 0,5 mm bis 1,0 mm eine hohe Effektivität. Lediglich die Canini mit 44 % und die Molaren mit 55 % des OK erreichten bei einer mittleren geplanten Bewegung von 0,8 mm und 0,5 mm nur eine Unterkorrektur beziehungsweise eine mäßige Effektivität.

In Abbildung 15 zeigt sich die erreichte mittlere relative Effektivität bei der Translationsbewegung in mesio-distaler Richtung. Die besten Ergebnisse der Bewegung nach mesio-distal erzielten die OK-Canini und die ersten Inzisivi des UK. Bei einer mittleren geplanten Bewegung von 0,7 mm zeigte sich eine hohe Effektivität von 76 % bis 79 %.

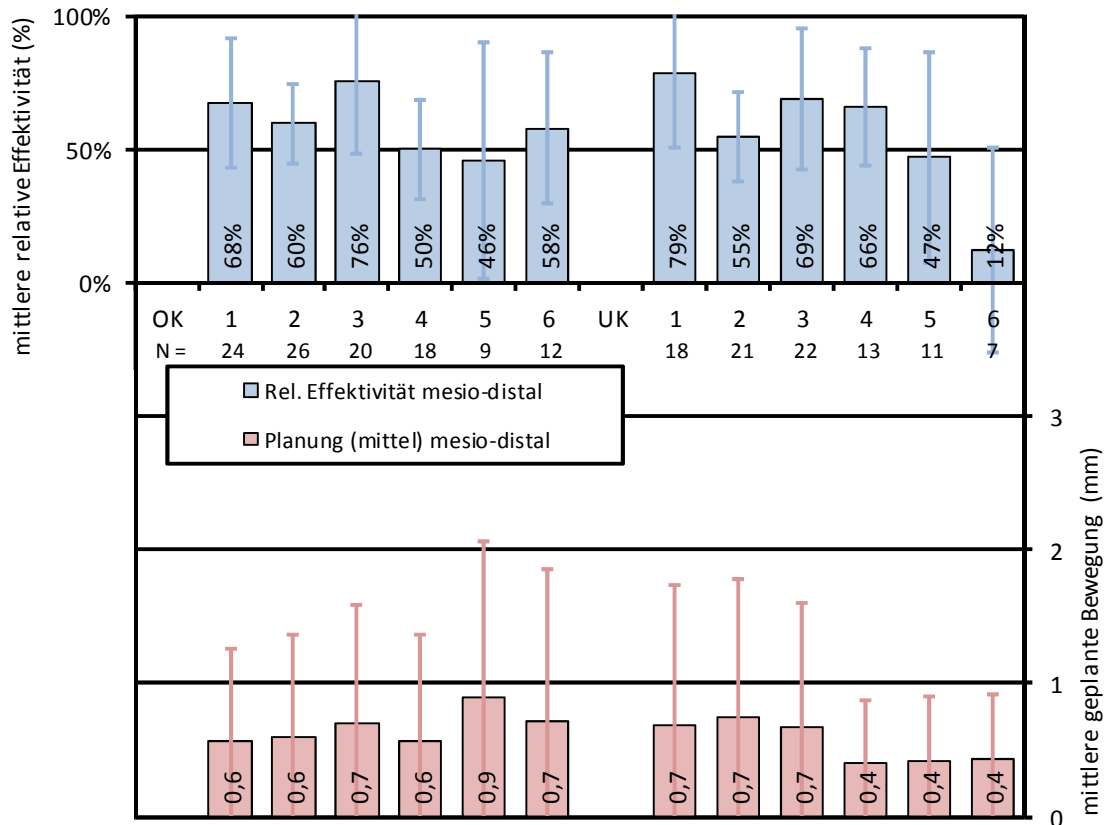


Abbildung 15: Säulendiagramm zur Darstellung der relativen Effektivität der Zahnbewegungen der gesamten Patientendaten. Es zeigt die Bewegungen entlang der y-Achse, d.h. Translationen nach mesial oder distal. Die oberen Säulen geben für jeden Zahntypen die relative Effektivität sowie den Fehler in Prozent an. Die unteren Säulen zeigen die mittlere geplante Bewegung in Millimetern sowie die Standardabweichung an. Die Anzahl N der für die jeweiligen Mittelwerte verwendeten Datensätze ist jeweils unterhalb der Zahntypen aufgelistet.

Betrachtet man die 1er und 6er des OK, die 2er und 4er beider Kiefer und die 3er des UK, so stellt man nur eine mäßige Effektivität zwischen 50 % und 69 % fest. Die mittleren geplanten Bewegungen lagen auch hier nicht über 0,7 mm. Mit der höchsten geplanten Bewegung von 0,9 mm zeigten die oberen zweiten Prämolaren bei einer geringeren Datenmenge von 9 einbezogenen Werten nur eine Unterkorrektur. Diese war auch bei den 5ern sowie den 6ern des UK zu beobachten (46 % und 12 %). Es ist festzustellen, dass eine große Abweichung der geplanten Bewegungen bei den UK-Frontzähnen aufzufinden war. Die 1er können trotzdem mit einer hohen Effektivität bewegt werden.

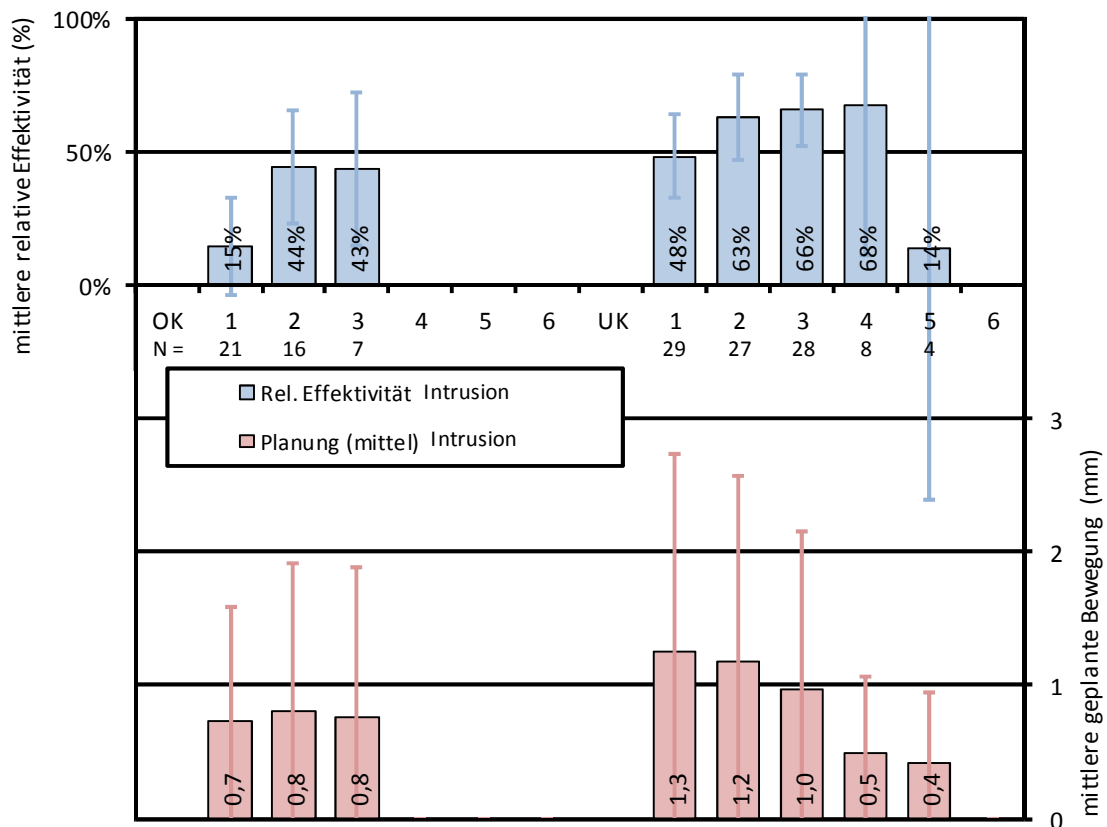


Abbildung 16: Säulendiagramm zur Darstellung der relativen Effektivität der Zahnbewegungen der gesamten Patientendaten. Es zeigt die negative Translation entlang der z-Achse, d.h. Intrusionsbewegung in apikale Richtung. Die oberen Säulen geben für jeden Zahntyp die relative Effektivität sowie den Fehler in Prozent an. Die unteren Säulen zeigen die mittlere geplante Bewegung in Millimetern sowie die Standardabweichung an. Die Anzahl N der für die jeweiligen Mittelwerte verwendeten Datensätze ist jeweils unterhalb der Zahntypen aufgelistet.

Anhand des Säulendiagramms der Abbildung 16 wird durch die mittlere relative Effektivität die Übereinstimmung der geplanten und erreichten Intrusionsbewegung angezeigt. Die Prämolaren des OK und die Molaren beider Kiefer sind nicht analysiert worden, da die Anzahl der verwertbaren Datensätze zu gering war. Die UK 2er, 3er und 4er erreichten mit 63 % bis 68 % eine mäßige Effektivität bei geplanten mittleren Bewegungen zwischen 1,2 mm und 0,5 mm. Eine Unterkorrektur wurde bei den gesamten OK-Zähnen sowie den UK ersten Inzivi sowie den zweiten Prämolaren erreicht. Die Werte schwankten zwischen 14 % und 48 %. Die 5er des UK zeigten einen großen Fehler der Effektivität bei nur geringer Anzahl von vier in die Analyse mit einbezogenen Patientendaten.

Alle positiven Werte der Translation auf der z-Achse geben die Extrusionsbewegung an. Das Säulendiagramm aus Abbildung 17 zeigt die erreichte mittlere relative Effektivität dieser Bewegung. Alle Zähne des OK erreichten bei einer mittleren geplanten Bewegung von 0,4 bis 0,7 mm nur eine Unterkorrektur mit einer mittleren relativen Effektivität von unter 40 %. Die 5er und 6er des OK zeigten, wie auch die Canini des UK einen negativen Wert der durch Überlagerungen und Messfehler hervorgerufen worden sein kann. Die höchste geplante Bewegung war mit 1,5 mm die der UK-3er. Auffällig ist bei dieser Bewegung und diesem Zahntyp die hohe Standardabweichung. Diese anzeigt, dass sowohl sehr kleine als auch sehr große Bewegungen geplant worden sind.

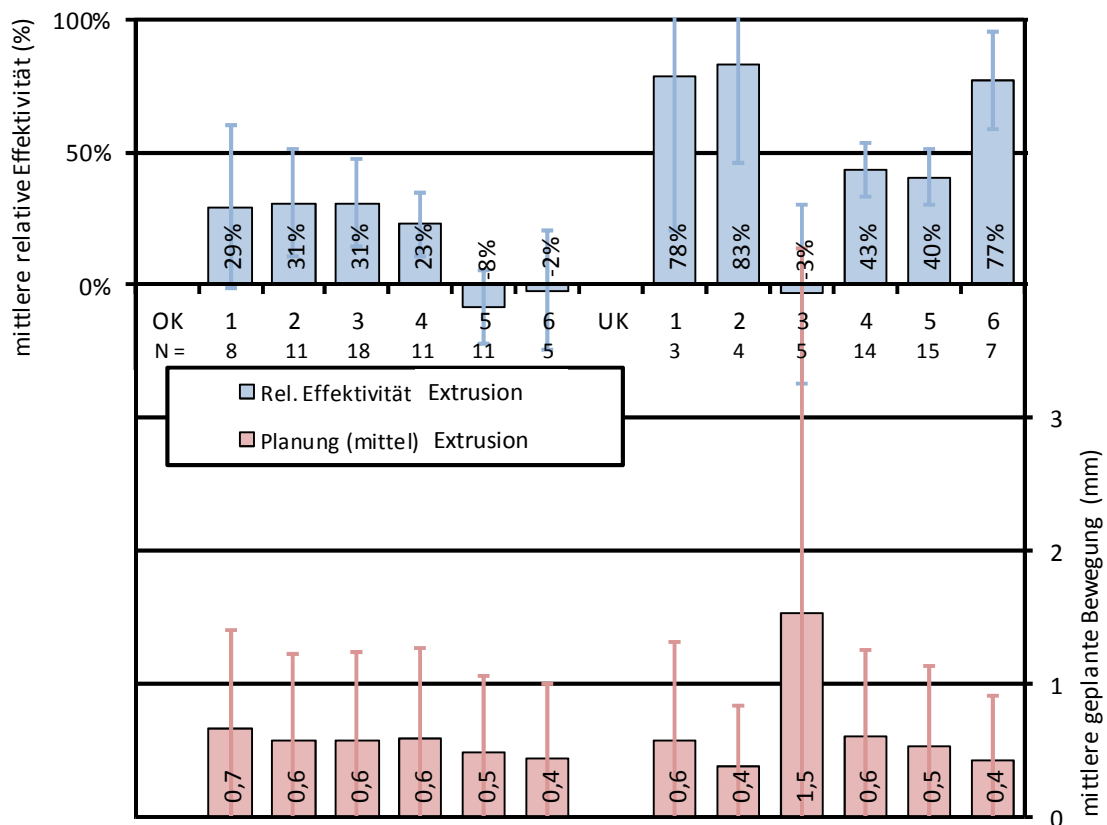


Abbildung 17: Säulendiagramm zur Darstellung der relativen Effektivität der Zahnbewegungen der gesamten Patientendaten. Es zeigt die positive Translation entlang der z-Achse, d.h. Extrusionsbewegungen in koronale Richtung. Die oberen Säulen geben für jeden Zahntypen die relative Effektivität sowie den Fehler in Prozent an. Die unteren Säulen zeigen die mittlere geplante Bewegung in Millimetern sowie die Standardabweichung an. Die Anzahl N der für die jeweiligen Mittelwerte verwendeten Datensätze ist jeweils unterhalb der Zahntypen aufgelistet.

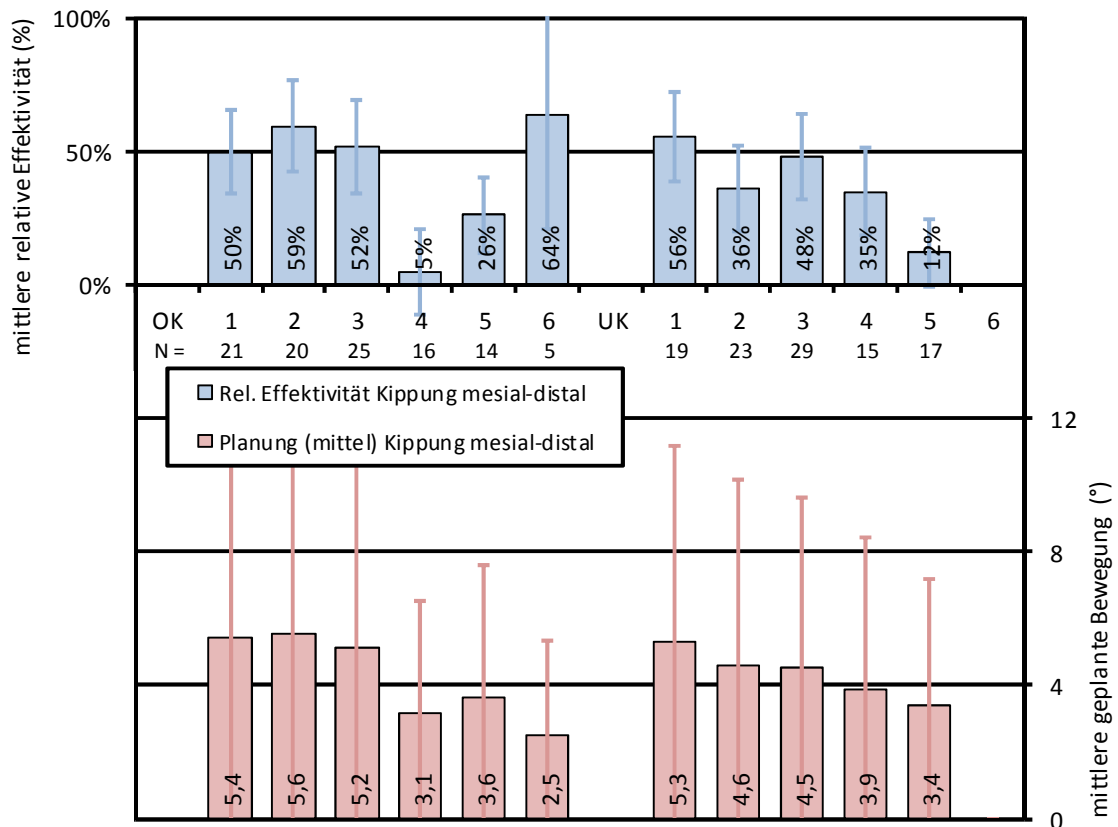


Abbildung 18: Säulendiagramm zur Darstellung der relativen Effektivität der Zahnbewegungen der gesamten Patientendaten. Es zeigt die Rotation um die x-Achse, d.h. Kippungen der Krone nach mesial oder distal. Die oberen Säulen geben für jeden Zahntypen die relative Effektivität sowie den Fehler in Prozent an. Die unteren Säulen zeigen die mittlere geplante Bewegung in Millimetern sowie die Standardabweichung an. Die Anzahl N der für die jeweiligen Mittelwerte verwendeten Datensätze ist jeweils unterhalb der Zahntypen aufgelistet.

Ebenfalls unterkorrigiert waren die Prämolaren des UK mit 43 % und 40 %. Eine hohe Effektivität zeigten dagegen die Bewegungen der Inzisivi und 6er des UK. Die Werte befanden sich hier zwischen 77 % und 83 %. Die mittlere geplante Bewegung lag zwischen 0,4 mm (2er) und 0,6 mm (1er), wobei die Datenmenge bei den 1er mit drei Datensätzen sehr gering war und somit weniger aussagekräftig.

In Abbildung 18 kann anhand der oberen Säulen die mittlere relative Effektivität abgelesen werden, mit der die geplante Kippung, sichtbar in den unteren Säulen, erreicht werden kann. Bei der Kippung, also der Rotation um die x-Achse, erhielten die UK-Molaren zu wenige auswertbare Daten, sodass diese nicht mit in die Analyse eingegangen sind. Die mittlere geplante Kippung in der Front lag bei 4,5° bis 5,6°, wohingegen bei den Sei-

tenzähnen deutlich geringere Bewegungen geplant worden sind (2,5° bis 3,9°). Trotz der größeren mittleren geplanten Bewegung erreichen nur die OK-Frontzähne sowie die UK-1er eine mäßige Effektivität (50 % bis 59 %). Auch die OK-6er zeigten mit 64 % eine mäßige Effektivität. Die restlichen Zähne beider Kiefer wurden unterkorrigiert. Sehr deutlich wird dies bei den OK-4ern mit einer Effektivität von nur 5 %.

Die Rotation um die y-Achse zeigt eine Kippung der Zahnkrone nach oro-vestibulär, dessen mittlere relative Effektivität im Säulendiagramm der Abbildung 19 dargestellt wird. Die mittlere geplante Rotation lag mit 8,3° beziehungsweise 8,4° bei den 1ern deutlich über der des Seitenzahnbereichs (2,6° bis 5,3°). Auch wenn die Standardab-

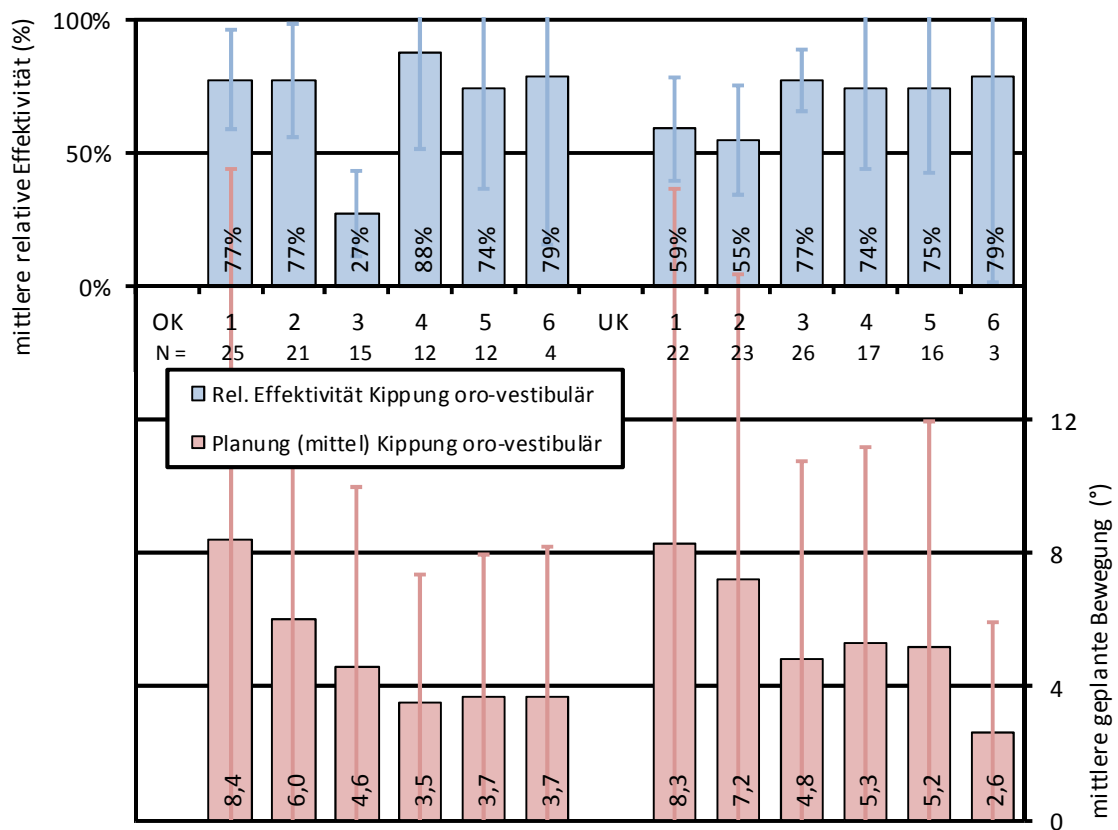


Abbildung 19: Säulendiagramm zur Darstellung der relativen Effektivität der Zahnbewegungen der gesamten Patientendaten. Es zeigt die Rotation um die y-Achse, d.h. Kippungen der Krone nach oral- bzw. vestibulär. Die oberen Säulen geben für jeden Zahntypen die relative Effektivität sowie den Fehler in Prozent an. Die unteren Säulen zeigen die mittlere geplante Bewegung in Millimetern sowie die Standardabweichung an. Die Anzahl N der für die jeweiligen Mittelwerte verwendeten Datensätze ist jeweils unterhalb der Zahntypen aufgelistet.

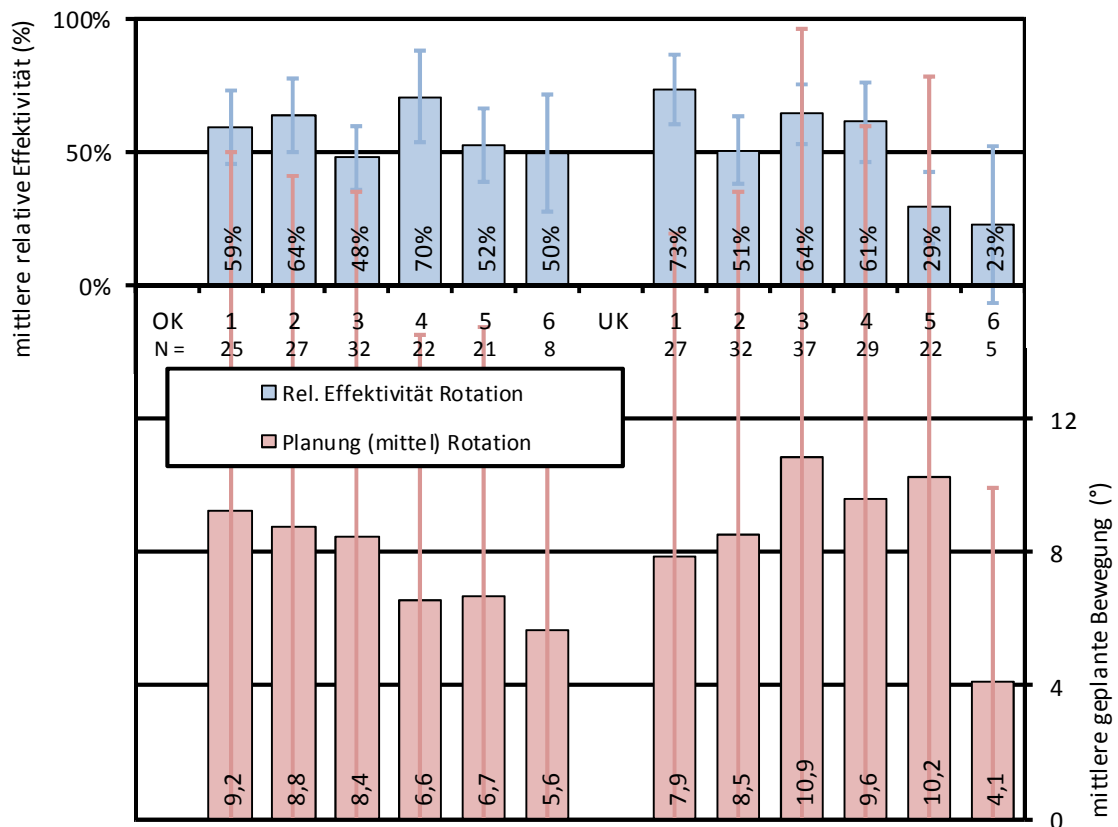


Abbildung 20: Säulendiagramm zur Darstellung der relativen Effektivität der Zahnbewegungen der gesamten Patientendaten. Es zeigt die Rotation um die z- Achse, d.h. eine Rotation um die Zahn längsachse. Die oberen Säulen geben für jeden Zahntypen die relative Effektivität sowie den Fehler in Prozent an. Die unteren Säulen zeigen die mittlere geplante Bewegung in Millimetern sowie die Standardabweichung an. Die Anzahl N der für die jeweiligen Mittelwerte verwendeten Datensätze ist jeweils unterhalb der Zahntypen aufgelistet.

weichung der geplanten Bewegung der 1er sehr groß war, so ist die Schwankung der Effektivität gering. Die OK-Inzisivi lassen sich mit einer Effektivität von 77 %n anscheinend besser bewegen als die UK-Inzisivi (55 % bis 59 %). Die Ok-3er wurden mit 27 % bei einer mittleren geplanten Bewegung von 4,6° unterkorrigiert. Eine hohe Effektivität zeigten die Seitenzähne des OK und UK sowie die UK-3er (74 % bis 84 %). Bei den UK-6ern wurde jedoch ein großer Fehler im Bereich der Effektivität festgestellt. Die einzelnen Zähne zeigten somit größere Unterschiede bei der Übereinstimmung von geplanter zu erreichter Bewegung.

In Abbildung 20 wird anhand des Säulendiagramms die mittlere relative Effektivität der Rotationen um die Zahn längsachse im Sinne einer mesialen oder distalen Rotation ver-

deutlicht. Bei Rotationen um die z-Achse sind vor allem bei den UK-3ern große Bewegungen geplant worden ($10,9^\circ$). Es zeigte sich jedoch nur eine mäßige Effektivität von 64 %. Auch die UK-5er zeigten mit $10,2^\circ$ eine hohe mittlere geplante Bewegung. Mit 29 % sind diese allerdings genauso wie die 6er des gleichen Kiefers (23 %) unterkorrigiert worden. Auch die OK-3er erreichten bei einer mittleren geplanten Bewegung von $8,4^\circ$ nur eine Effektivität von 48 %. Die Inzisivi, die 5er und 6er des OK sowie die 2er und 4er des UK zeigten von 50 % bis 64 % und somit eine mäßige Effektivität. Die Rotation der OK 4er und UK 1er schienen besser zu funktionieren (70 % bis 73 %).

4.3 Ergebnisse der Invisalign®-Teen-Patientengruppe T

Diagramm in Abbildung 21 zeigt die mittlere geplante Effektivität mit der die geplanten Translationsbewegungen auf der x-Achse durchgeführt wurden. Die mittlere geplante Bewegung der Inzisivi ist mit 1,1 mm im OK und 1,0 mm UK am höchsten. Durch die hohe Standardabweichung ist zu erkennen, dass unterschiedlich große Bewegungen der einzelnen Zähne geplant wurden. Diese konnten im OK mit einer mäßigen Effektivität erreicht werden, wogegen im UK eine hohe Effektivität mit 83 % festzustellen war. Die OK-Molaren zeigten mit 148 %, die OK-3er und 4er mit 62 % und 66 % eine mäßige Effektivität bei einer mittleren geplanten Bewegung von 0,4 mm und 0,6 mm. Werte hoher Effektivität erreichten die OK-2er, -5er, UK-3er und -6er. Diese lagen zwischen 75 % und 85 % bei einer durchschnittlichen geplanten Bewegung um 0,7 mm. Eine sehr hohe Effektivität ergaben die Translationen der UK-4er, -5er und -3er mit Werten zwischen 94 % und 98 % bei einer mittleren geplanten Bewegung zwischen 0,7 mm und 0,9 mm.

Die in Abbildung 22 dargestellten Säulen geben die erreichte mittlere relative Effektivität bei der geplanten Translationsbewegung nach mesial und distal auf der y-Achse an. Aufgrund einer zu geringen Datenmenge wurden die Ergebnisse der UK-5er nicht weiter ausgewertet. Auffällig ist bei dieser Bewegung ein negativer Wert der Effektivität der 6er beider Kiefer. Diese können durch Messfehler sowie Überlagerungen anderer Bewegungen entstanden sein. Es ist auch zu beachten, dass nur eine geringe Datenanzahl

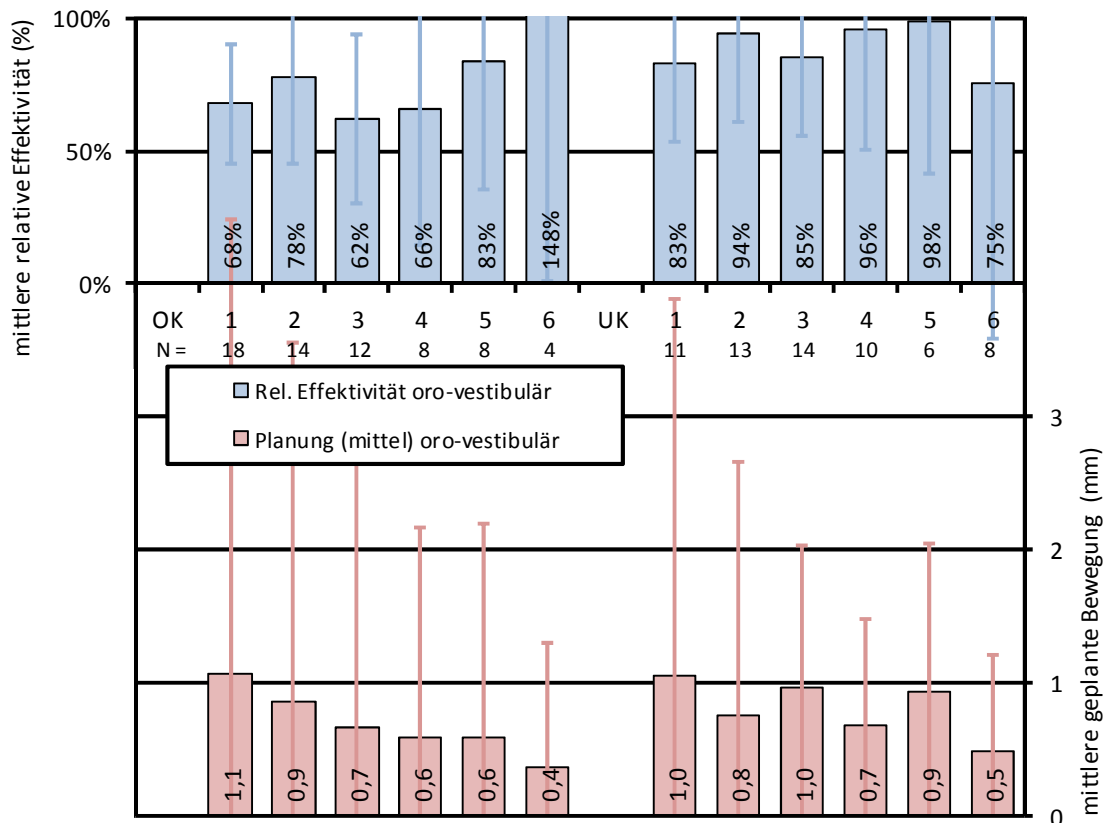


Abbildung 21: Säulendiagramm zur Darstellung der relativen Effektivität der Zahnbewegungen bei der Patientengruppe T. Es zeigt die Bewegungen entlang der x-Achse, d.h. Translationen nach oral oder vestibulär. Die oberen Säulen geben für jeden Zahntypen die relative Effektivität sowie den Fehler in Prozent an. Die unteren Säulen zeigen die mittlere geplante Bewegung in Millimetern sowie die Standardabweichung an. Die Anzahl N der für die jeweiligen Mittelwerte verwendeten Datensätze ist jeweils unterhalb der Zahntypen aufgelistet.

von vier und drei Datensätzen vorlag und der Fehlerbalken eine große Spanne aufweist. Unterkorrigiert wurden auch die OK-2er, 3er und 5er mit Werten zwischen 42 % und 48 %. Die zweiten Prämolaren des OK zeigten dabei die höchste mittlere geplante Bewegung von 1,2 mm. Die Standardabweichung zeigt an, dass sowohl sehr kleine als auch sehr große Bewegungen geplant wurden. Eine mäßige Effektivität wurde bei den OK-4ern und UK-2ern erreicht. Ein besseres Ergebnis zeigte sich bei den 1ern beider Kiefer und den Canini des UK sowie 4ern. Diese erreichten mit 78 % bis 88 % eine hohe Effektivität bei einer mittleren geplanten Bewegung von 0,4 mm bis 1,2 mm.

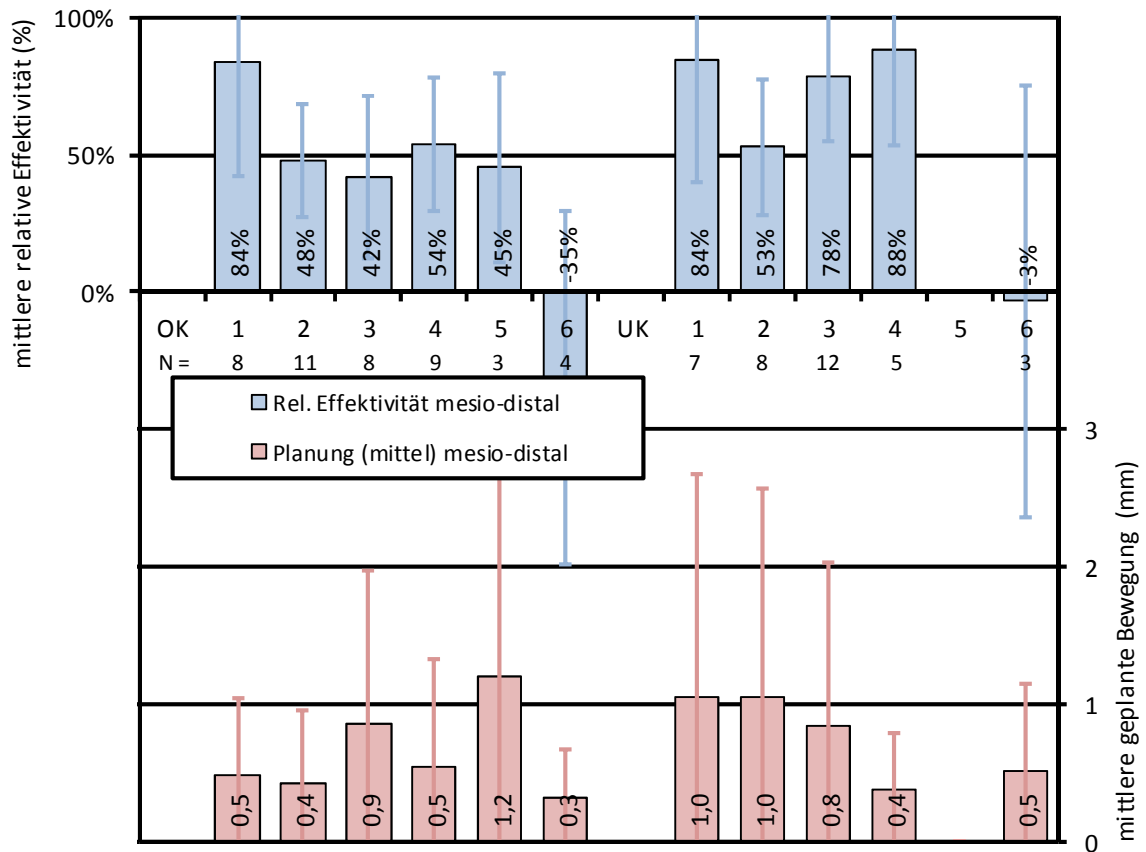


Abbildung 22: Säulendiagramm zur Darstellung der relativen Effektivität der Zahnbewegungen bei der Patientengruppe T. Es zeigt die Bewegungen entlang der y-Achse, d.h. Translationen nach mesial oder distal. Die oberen Säulen geben für jeden Zahntyp die relative Effektivität sowie den Fehler in Prozent an. Die unteren Säulen zeigen die mittlere geplante Bewegung in mm sowie die Standardabweichung an. Die Anzahl N der für die jeweiligen Mittelwerte verwendeten Datensätze ist jeweils unterhalb der Zahntypen aufgelistet.

Die in Abbildung 23 dargestellten Säulen geben die erreichte mittlere relative Effektivität bei der geplanten Translationsbewegung auf der z-Achse an. Die Seitenzähne wurden nicht weiter analysiert, da nicht genügend Datensätze vorhanden waren. Es zeigte sich ein deutlicher Unterschied zwischen den beiden Kiefern. Die mittlere geplante Bewegung im OK ist zwischen 0,4 mm und 0,6 mm geringer als im UK. Hier sind Bewegungen zwischen 0,8 mm und 1,1 mm geplant. Alle Werte der Effektivität des OK befinden sich im negativen Bereich, was auf eine Unterkorrektur sowie Mess- und Überlagerungs-

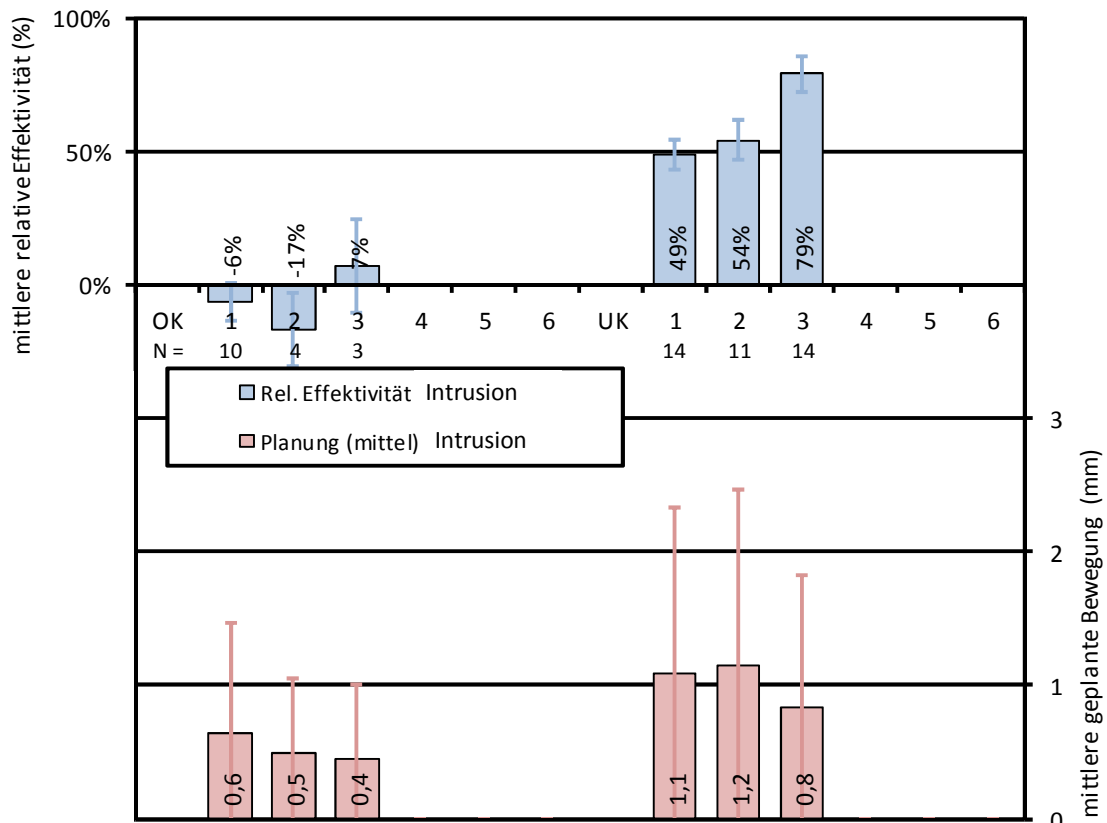


Abbildung 23: Säulendiagramm zur Darstellung der relativen Effektivität der Zahnbewegungen bei der Patientengruppe T. Es zeigt die negative Translation entlang der z-Achse, d.h. Intrusionsbewegung in apikale Richtung. Die oberen Säulen geben für jeden Zahntypen die relative Effektivität sowie den Fehler in Prozent an. Die unteren Säulen zeigen die mittlere geplante Bewegung in Millimetern sowie die Standardabweichung an. Die Anzahl N der für die jeweiligen Mittelwerte verwendeten Datensätze ist jeweils unterhalb der Zahntypen aufgelistet.

fehler hindeutet. Die ersten Inzisivi des UK konnten mit 49 % ebenfalls nur unterkorrigiert werden. Die 2er zeigten eine mäßige Effektivität, wobei die 3er mit 79 % eine hohe Effektivität aufwiesen. Die Fehlerbalken der Effektivität im UK sind sehr klein und die der mittleren geplanten Bewegung im Verhältnis vergrößert. Dies führt zum Rückschluss, dass sowohl kleine als auch große Bewegungen mit einer ähnlichen Effektivität durchgeführt werden können.

Mit welcher Effektivität die Extrusionsbewegung durchgeführt werden kann, wird in Abbildung 24 deutlich. Anders als bei der Intrusionsbewegung konnten nur Aussagen zu den Seitenzahnbewegungen getroffen werden, da für diese Zähne eine ausreichende

Datenmenge vorlag. Stattdessen sind die ersten Inzisivi beider Kiefer, die Molaren des OK, die zweiten Inzisiv und Canini des UK aufgrund geringer Datenmengen nicht weiter analysiert worden. Auch hier scheinen die Bewegungen im UK besser durchführbar. Die Prämolaren erreichten ein mäßiges Ergebnis knapp unter 70 %, die Molaren sogar einen Wert der hohen Effektivität mit 78 % bei einer mittleren geplanten Bewegung von 0,4 mm. Die OK-Zähne wurden durchweg unterkorrigiert, bei Werten zwischen 11 % und 44 %.

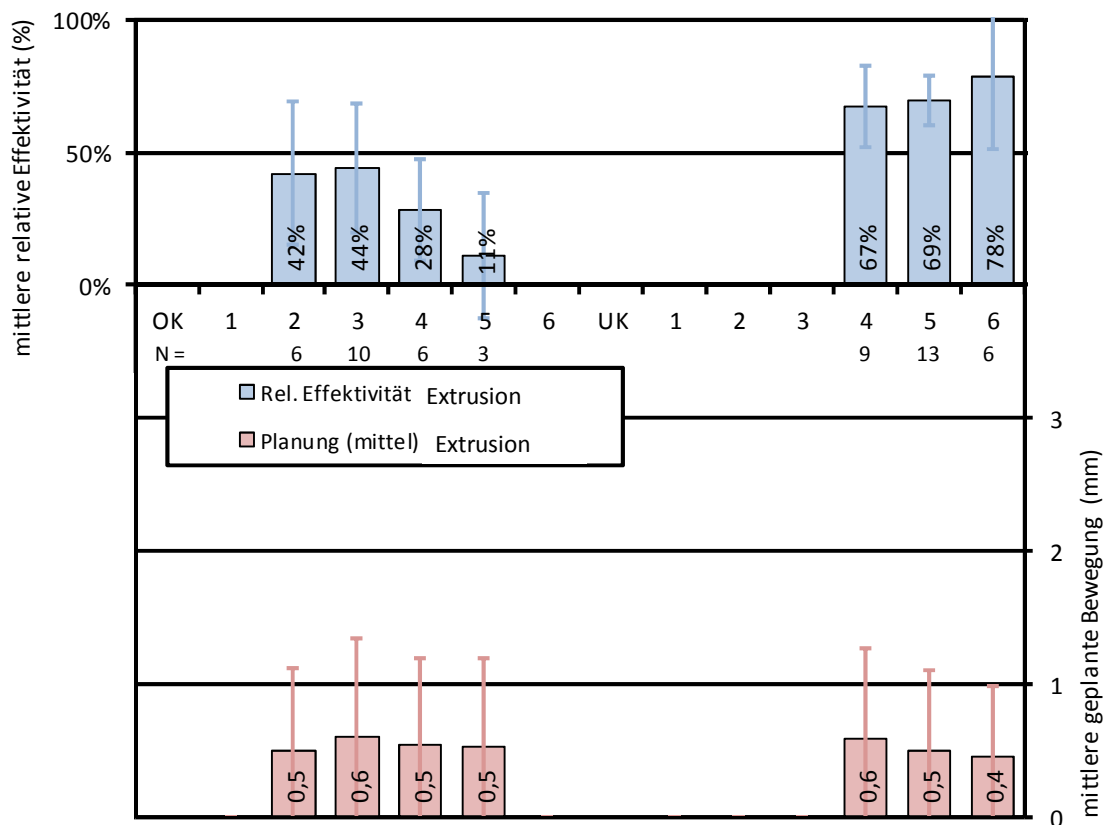


Abbildung 24: Säulendiagramm zur Darstellung der relativen Effektivität der Zahnbewegungen bei der Patientengruppe T. Es zeigt die positive Translation entlang der z-Achse, d.h. Extrusionsbewegung in koronaler Richtung. Die oberen Säulen geben für jeden Zahntypen die relative Effektivität sowie den Fehler in Prozent an. Die unteren Säulen zeigen die mittlere geplante Bewegung in Millimeter sowie die Standardabweichung an. Die Anzahl N der für die jeweiligen Mittelwerte verwendeten Datensätze ist jeweils unterhalb der Zahntypen aufgelistet.

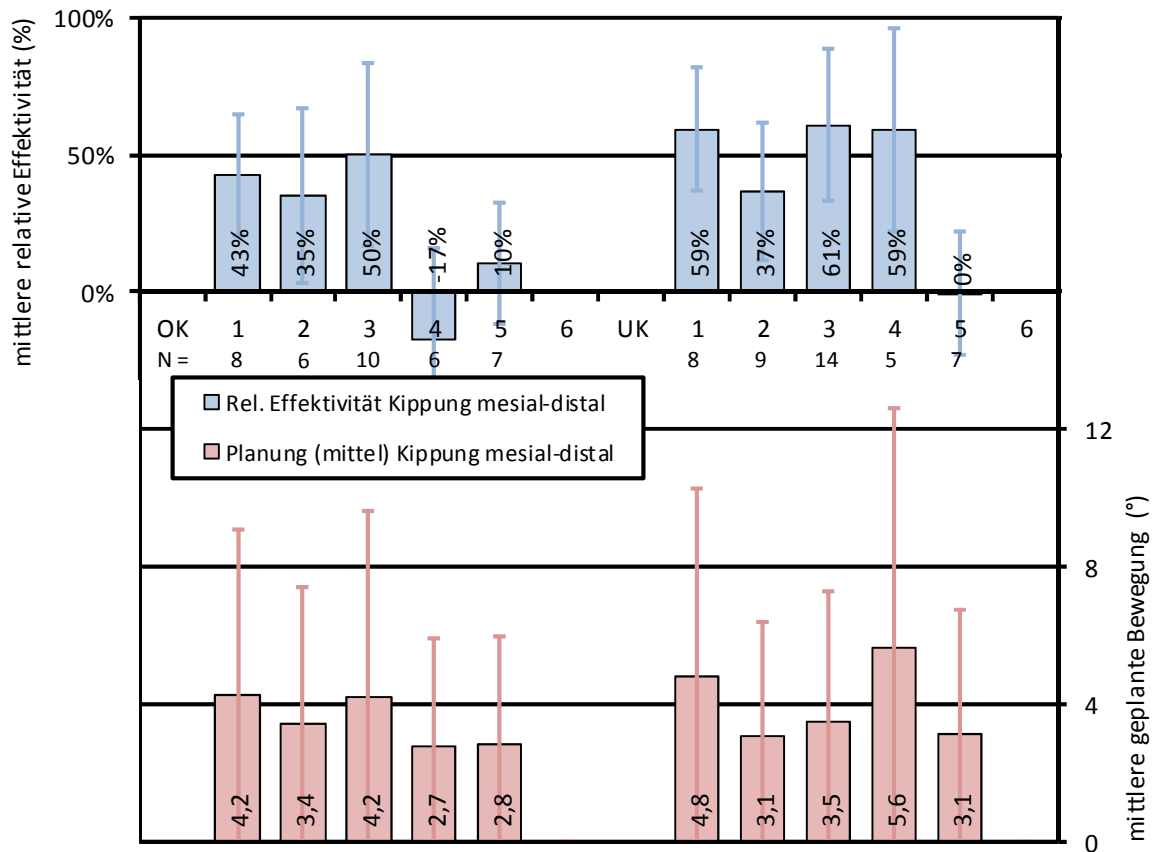


Abbildung 25: Säulendiagramm zur Darstellung der relativen Effektivität der Zahnbewegungen bei der Patientengruppe T. Es zeigt die Rotation um die x-Achse, d.h. Kippungen der Krone nach mesial oder distal. Die oberen Säulen geben für jeden Zahntypen die relative Effektivität sowie den Fehler in Prozent an. Die unteren Säulen zeigen die mittlere geplante Bewegung in Grad sowie die Standardabweichung an. Die Anzahl N der für die jeweiligen Mittelwerte verwendeten Datensätze ist jeweils unterhalb der Zahntypen aufgelistet.

Die Übereinstimmung zwischen geplanter und erfolgter Rotation auf der x-Achse, also der Kippung nach mesial oder distal, wird im Säulendiagramm der Abbildung 25 deutlich. Die Anzahl der verwertbaren Daten der 6er war so gering, dass diese aus der weiteren Auswertung ausgeschlossen wurden. Auffällig ist der negative Wert der Effektivität bei der Kippung der OK-4er. Dieser kann durch Messfehler sowie Überlagerungen von anderen Bewegungen erfolgt sein. Weitere deutliche Unterkorrekturen zeigten sich mit 10 % bei den OK-5ern sowie mit 0 % bei den UK-5ern. Auch die OK-Inzisivi sowie die zweiten Inzisivi des UK erreichten keine mäßige Übereinstimmung (35 % bis 43 %). Die höchste mittlere geplante Bewegung zeigte sich bei den UK-4ern mit 5,6° und großer

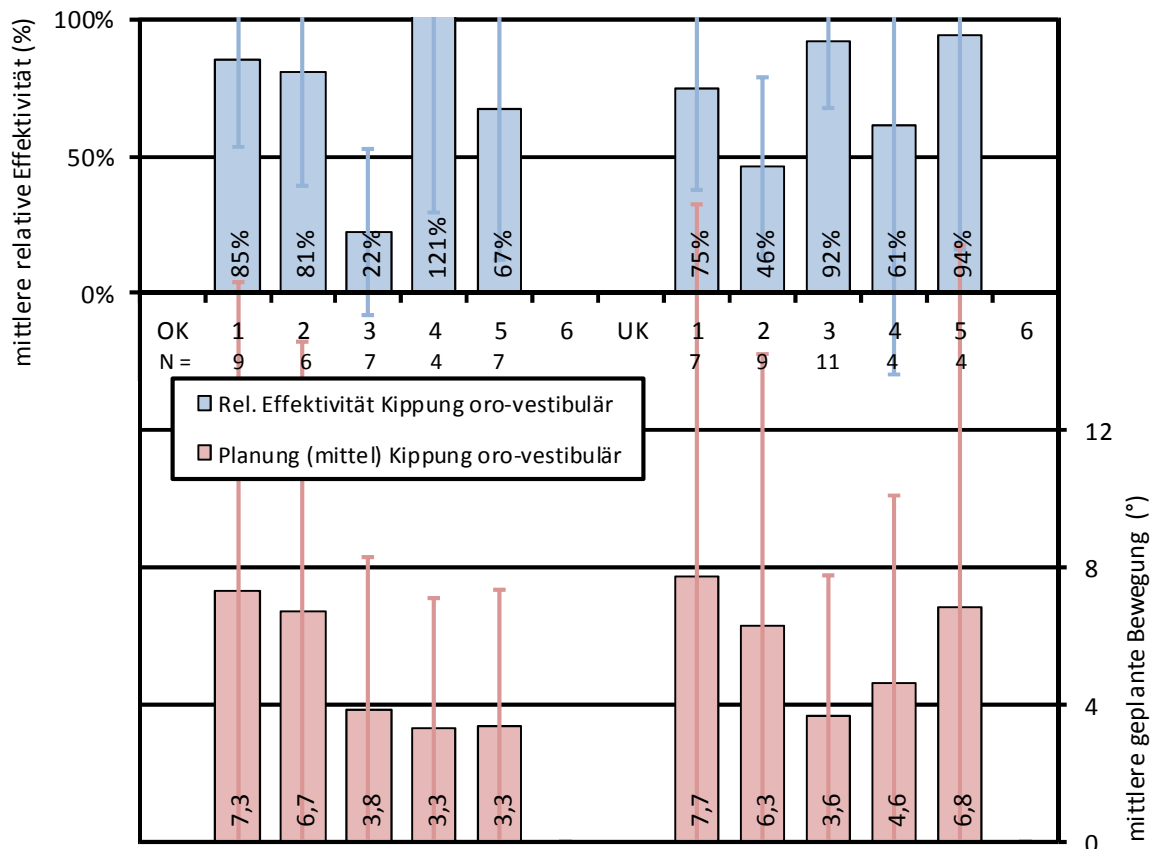


Abbildung 26: Säulendiagramm zur Darstellung der relativen Effektivität der Zahnbewegungen bei der Patientengruppe T. Es zeigt die Rotation um die y-Achse, d.h. Kippungen der Krone nach oral- bzw. vestibulär. Die oberen Säulen geben für jeden Zahntypen die relative Effektivität sowie den Fehler in Prozent an. Die unteren Säulen zeigen die mittlere geplante Bewegung in Grad sowie die Standardabweichung an. Die Anzahl N der für die jeweiligen Mittelwerte verwendeten Datensätze ist jeweils unterhalb der Zahntypen aufgelistet.

Standardabweichung. Es zeigte sich, dass sowohl kleine als auch größere Bewegungen mit durchschnittlich 59 % eine mäßige Effektivität erreichen. Ebenfalls wurde eine mäßige Effektivität bei den 3ern beider Kiefer sowie den 1ern des UK festgestellt. Die Werte lagen hier zwischen 50 % bis 61 %.

In Abbildung 26 wird anhand des Säulendiagramms die mittlere relative Effektivität der Rotation um die y-Achse ermittelt. Hierbei konnten die Werte der Molaren in beiden Kiefern nicht mit einbezogen werden, da die Anzahl nicht ausreichte. Eine Unterkorrektur zeigte sich bei den Canini des OK sowie den UK-2ern (22 % und 46 %). Eine mäßige Effektivität zeigten die UK-4er und OK-5er. Bei einer mittleren geplanten Bewegung von

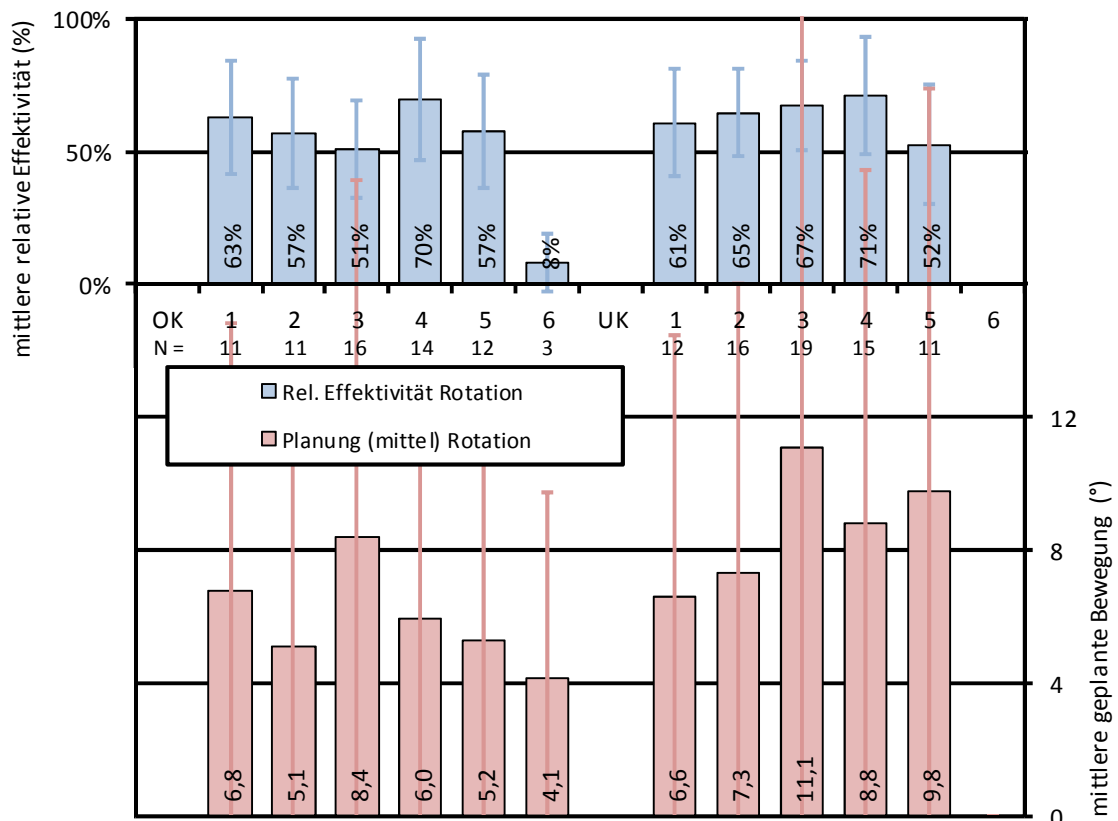


Abbildung 27: Säulendiagramm zur Darstellung der relativen Effektivität der Zahnbewegungen bei der Patientengruppe T. Es zeigt die Rotation um die z-Achse, d.h. eine Rotation um die Zahn längsachse. Die oberen Säulen geben für jeden Zahntypen die relative Effektivität sowie den Fehler in Prozent an. Die unteren Säulen zeigen die mittlere geplante Bewegung in Grad sowie die Standardabweichung an. Die Anzahl N der für die jeweiligen Mittelwerte verwendeten Datensätze ist jeweils unterhalb der Zahntypen aufgelistet.

4,6° bzw. 3,3° werden 61 % bzw. 67 % erreicht. Eine hohe Effektivität wurde bei den ersten Inzisivi beider Kiefer, den OK-4ern und UK-2ern erzielt. Hier liegen die Werte zwischen 75 % und 85 % sowie 121 %, bei hohen mittleren geplanten Bewegungen bis zu 7,7°. Bis zu 94 % erreichten die UK-5er die geplante Bewegung und somit, genau wie die Canini des UK (92 %) eine sehr hohe Effektivität.

Im Säulendiagramm aus Abbildung 27 wird die mittlere relative Effektivität, mit der die geplante Rotation um Zahn längsachse erreicht wird, dargestellt. Die UK-6er konnten aufgrund der geringen Datenmenge nicht ausgewertet werden. Die höchste mittlere geplante Bewegung fand sich bei den UK-3ern (11°) und wurde nur mit einer mäßigen Effektivität erreicht (67 %). Durch die Standardabweichung wird hier gezeigt, dass sowohl

größere als auch kleinere Werte in die Auswertung mit eingegangen sind. Mit mäßiger Effektivität wurden auch die Frontzähne und 5ern beider Kiefer bewegt (52 % bis 65 %). Nur die 4er beider Kiefer konnten eine hohe Effektivität von 70 % und 71 % erreichen. Einzig OK-6er schienen unterkorrigiert worden zu sein (8 %). Zu beachten ist, dass bei den OK-6ern mit drei Daten die geringste Datenmenge eingeflossen war.

4.4 Ergebnisse der Erwachsenengruppe A

Das Diagramm in Abbildung 28 stellt dar, zu wie viel Prozent die geplante Bewegung entlang der x-Achse, also eine Translation in oraler oder vestibuläre Richtung, stattge-

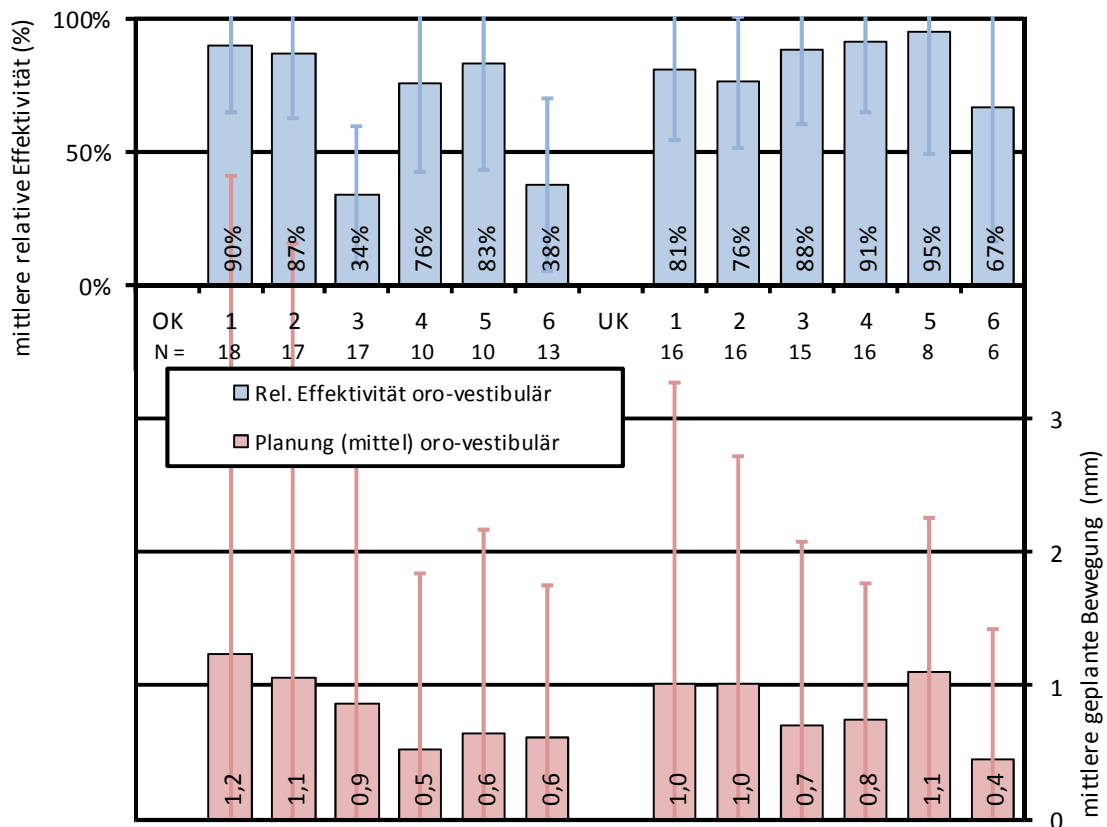


Abbildung 28: Säulendiagramm zur Darstellung der relativen Effektivität der Zahnbewegungen bei der Patientengruppe A. Es zeigt die Bewegungen entlang der x-Achse, d.h. Translationen nach oral oder vestibulär. Die oberen Säulen geben für jeden Zahntypen die relative Effektivität sowie den Fehler in Prozent an. Die unteren Säulen zeigen die mittlere geplante Bewegung in Millimetern sowie die Standardabweichung an. Die Anzahl N der für die jeweiligen Mittelwerte verwendeten Datensätze ist jeweils unterhalb der Zahntypen aufgelistet.

funden hat. Es wird deutlich, dass nur im OK Molaren und Canini unterkorrigiert wurden (38 % und 34 %). Mäßige Effektivität zeigten die Molaren des OK (67 %), bei mit einer Werteanzahl von sechs Patientendaten. Durchweg hohe Effektivität zeigten die Prämolaren des OK, die 2er beider Kiefer, die UK-Canini und ersten Inzisivi (76 % bis 88 %). Mit Ausnahme der zweiten Prämolaren des UK waren die mittleren geplanten Bewegungen der Seitenzähne (0,4 mm bis 0,7 mm) geringer als bei den Inzisivi (1,0 mm bis 1,2 mm). Trotz höchster mittlerer geplanter Bewegungen von 1,2 mm zeigten die ersten Inzisivi des OK, wie auch die Prämolaren des UK, eine sehr hohe Effektivität (90 % bis 95%).

Anhand des Diagramms in Abbildung 29 wird deutlich, dass alle mittleren geplanten Bewegungen in mesio-distaler Richtung, sowohl im UK als auch im OK, nicht über 1,0 mm lagen. Diese durchschnittlichen geplanten Werte werden bei den Prämolaren des OK, den zweiten Prämolaren und 6ern des UK nur zwischen 33 % und 47 % erreicht und blieben somit unterkorrigiert. Eine mäßige Effektivität (55 % bis 65 %) erreichten bei OK-1er, die 2er beider Kiefer sowie die ersten Prämolaren des UK. Im OK zeigten die ersten Molaren eine hohe Effektivität (74 %) bei Erreichen der mittleren geplanten Bewegung. Dies trifft mit 70 % auch auf die Uk-1er zu. Als einzige Zahngruppe zeigten die OK-3er eine sehr hohe Effektivität (108 %) bei einer mittleren geplanten Bewegung von 0,6 mm.

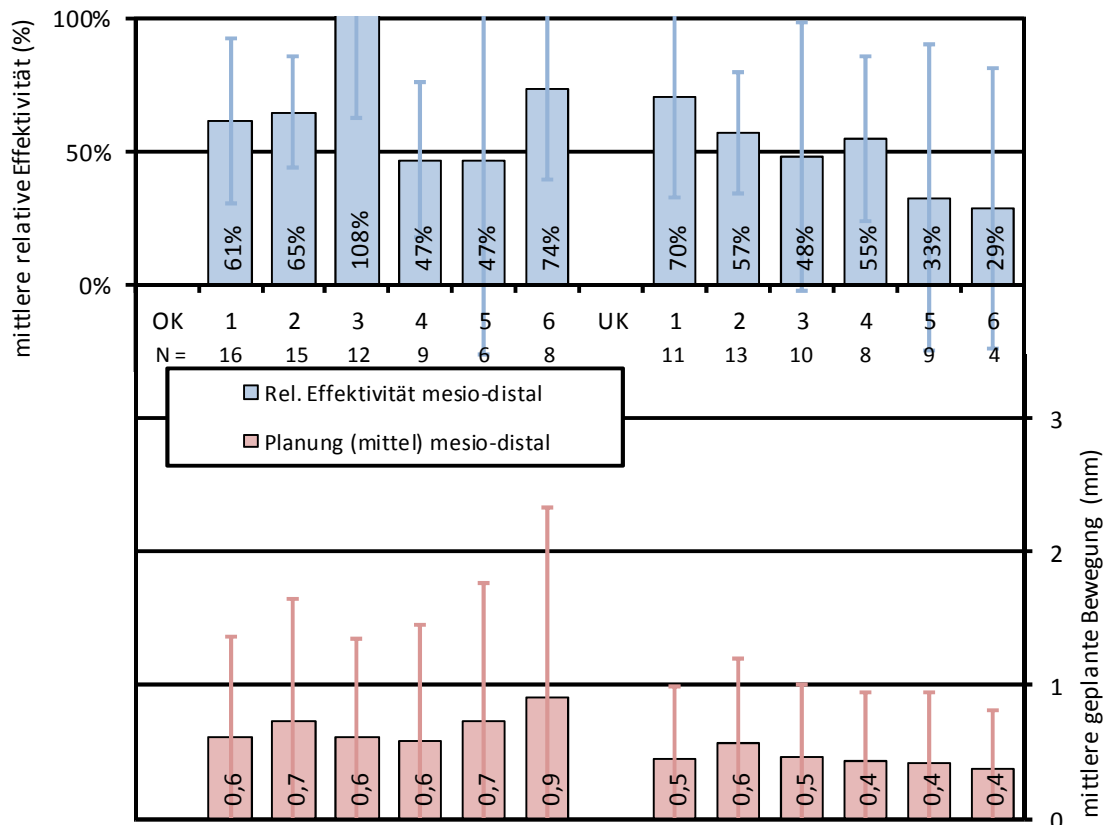


Abbildung 29: Säulendiagramm zur Darstellung der relativen Effektivität der Zahnbewegungen bei der Patientengruppe A. Es zeigt die Bewegungen entlang der y-Achse, d.h. Translationen nach mesial oder distal. Die oberen Säulen geben für jeden Zahntypen die relative Effektivität sowie den Fehler in Prozent an. Die unteren Säulen zeigen die mittlere geplante Bewegung in Millimetern sowie die Standardabweichung an. Die Anzahl N der für die jeweiligen Mittelwerte verwendeten Datensätze ist jeweils unterhalb der Zahntypen aufgelistet.

Im Säulendiagramm aus Abbildung 30 wird die prozentual erreichte Übereinstimmung zwischen mittlerer geplanter und mittlerer tatsächlich stattgefundener Intrusionsbewegung angezeigt. Aufgrund geringer Datenanzahl für die Prämolaren des OK und den 6er des OK und UK wurden diese nicht weiter analysiert. Die Prämolaren des UK wurden bei der geringsten mittleren geplanten Bewegung von 0,4 mm nur unterkorrigiert (14 %). Auch die ersten Inzisivi des UK (48 %) und OK (30 %) wurden unterkorrigiert, wenn auch die mittlere geplante Bewegung etwas höher bei 1,4 mm und 0,8 mm lag. Die ersten Prämolaren des UK erwiesen mit 81 % als einzige ein Ergebnis mit hoher Effektivität, wenn auch nur bei einer mittleren geplanten Bewegung von 0,5 mm. Alle übrigen

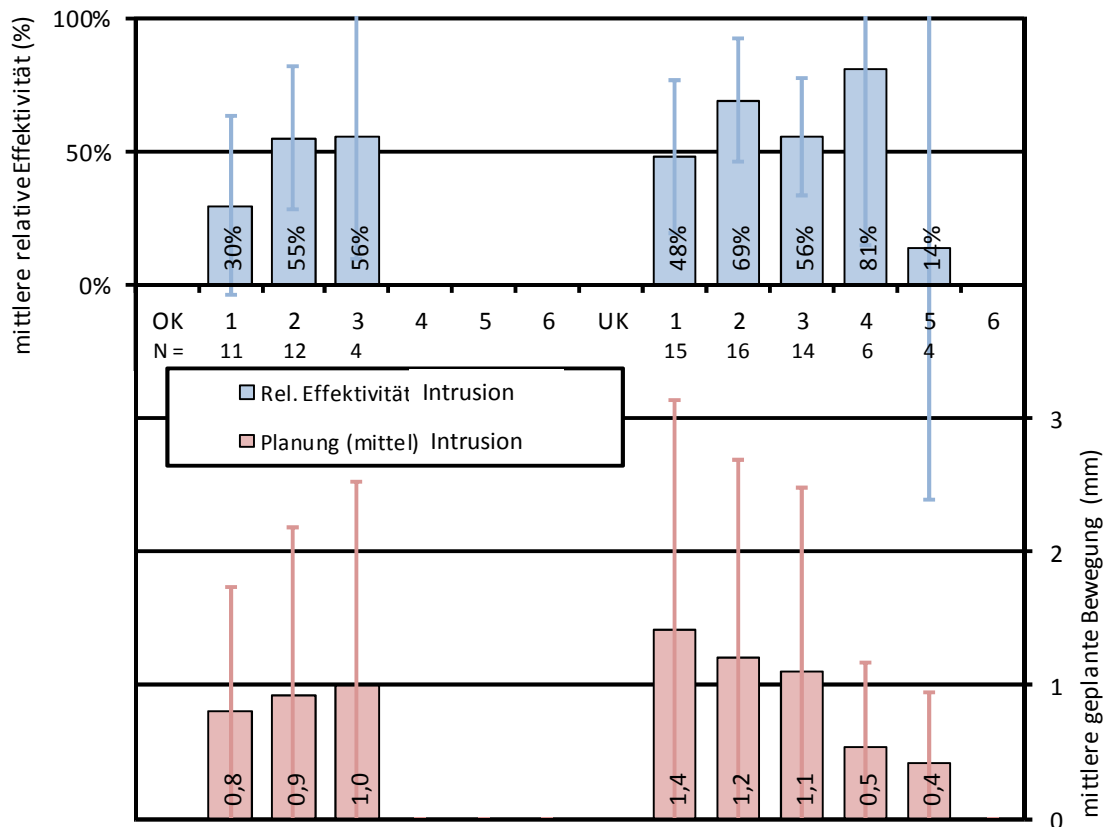


Abbildung 30: Säulendiagramm zur Darstellung der relativen Effektivität der Zahnbewegungen bei der Patientengruppe A. Es zeigt die negative Translation entlang der z-Achse, d.h. Intrusionsbewegung in apikale Richtung. Die oberen Säulen geben für jeden Zahntypen die relative Effektivität sowie den Fehler in Prozent an. Die unteren Säulen zeigen die mittlere geplante Bewegung in Millimeter sowie die Standardabweichung an. Die Anzahl N der für die jeweiligen Mittelwerte verwendeten Datensätze ist jeweils unterhalb der Zahntypen aufgelistet.

Zahngruppen zeigten nur mäßige Ergebnisse zwischen 55 % und 69 % bei einer mittleren geplanten Bewegung bis zu 1,2 mm.

Die in der Abbildung 31 zu erkennenden Daten zeigen mittlere geplante körperliche positive Translation des Zahns entlang der z-Achse im Sinne einer Extrusion sowie die erreichte Effektivität an. Aufgrund einer geringen verwertbaren Datenmenge sind die Inzisivi des UK und ersten Molaren nicht mit einbezogen worden. Kein Zahntyp erreichte 50 % der geplanten Bewegung und die entsprechenden Zähne waren somit durchweg unterkorrigiert. Die ermittelte negative Effektivität bei den Bewegungen der zweiten

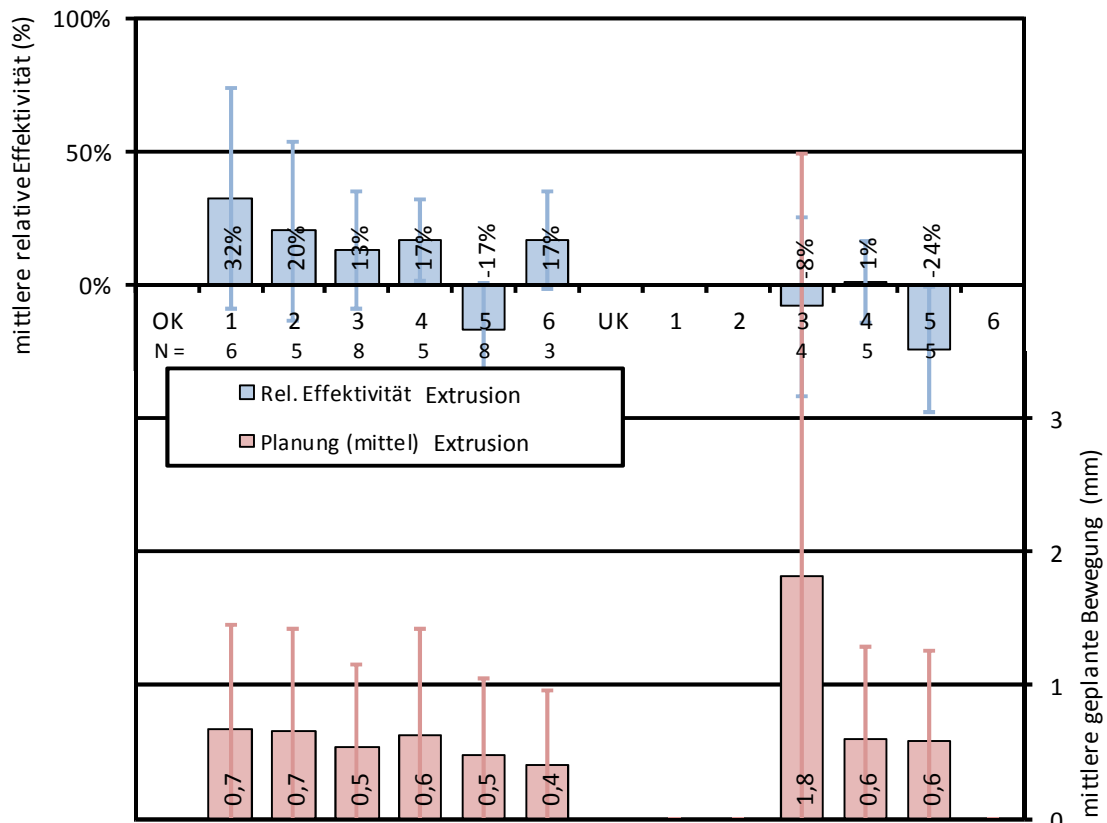


Abbildung 31: Säulendiagramm zur Darstellung der relativen Effektivität der Zahnbewegungen bei der Patientengruppe A. Es zeigt die positive Translation entlang der z-Achse, d.h. Extrusionsbewegungen in koronale Richtung. Die oberen Säulen geben für jeden Zahntypen die relative Effektivität sowie den Fehler in Prozent an. Die unteren Säulen zeigen die mittlere geplante Bewegung in Millimetern sowie die Standardabweichung an. Die Anzahl N der für die jeweiligen Mittelwerte verwendeten Datensätze ist jeweils unterhalb der Zahntypen aufgelistet.

Prämolaren in OK und UK sowie der Canini im UK kann durch Ungenauigkeit des Messverfahrens oder die Überlagerung dieser Bewegung mit Bewegungen in anderen Achsenrichtungen entstanden sein. Die größte mittlere geplante Bewegung ist mit 1,8° bei den UK Canini aufzufinden.

Rotationen um die x-Achse führen zu einer Kippung der Krone nach mesial oder distal. Die ersten Molaren des UK mussten aufgrund von wenigen verwertbaren Daten nicht weiter bewertet (Abbildung 32). Die Frontzähne des OK und UK zeigten in dieser Kategorie die höchste mittlere geplante Bewegung von durchschnittlich 5,8°. Im OK erreichten alle Frontzahntypen ein mäßiges Ergebnis zwischen 53 % und 65 %, genau wie im

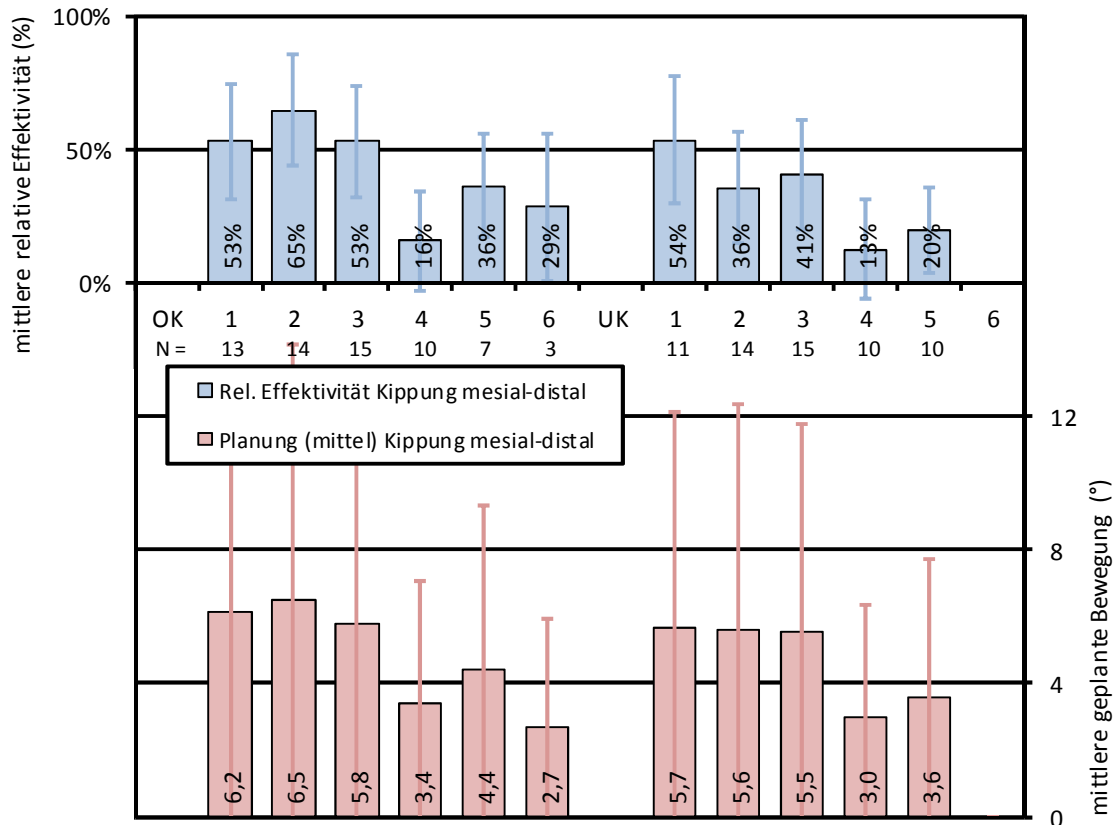


Abbildung 32: Säulendiagramm zur Darstellung der relativen Effektivität der Zahnbewegungen bei der Patientengruppe A. Es zeigt die Rotation um die x-Achse, d.h. Kippungen der Krone nach mesial oder distal. Die oberen Säulen geben für jeden Zahntypen die relative Effektivität sowie den Fehler in Prozent an. Die unteren Säulen zeigen die mittlere geplante Bewegung in Grad sowie die Standardabweichung an. Die Anzahl N der für die jeweiligen Mittelwerte verwendeten Datensätze ist jeweils unterhalb der Zahntypen aufgelistet.

UK die ersten Inzisivi mit 54 %. Alle anderen Zahntypen des UK konnten nur eine Unterkorrektur zwischen 13 % bis 41 % aufweisen. Ebenfalls unterkorrigiert erschienen die Seitenzähne des OK (16 % bis 36 %). Bei einer geplanten mittleren Bewegung zwischen 2,7° und 4,4°.

Im Säulendiagramm der Abbildung 33 wird die Effektivität der Kronenbewegung um die y-Achse, also einer Kippung nach oro-vestibulär, dargestellt. Die Molaren des UK konnten nicht in die Analyse einbezogen werden, da nicht genügend Daten vorlagen. Auffällig ist die sehr hohe Effektivität (116 %) der Bewegung der ersten Molaren des OK, bei einer mittleren geplanten Bewegung von 3,5°, aber nur einer geringen Datenmenge.

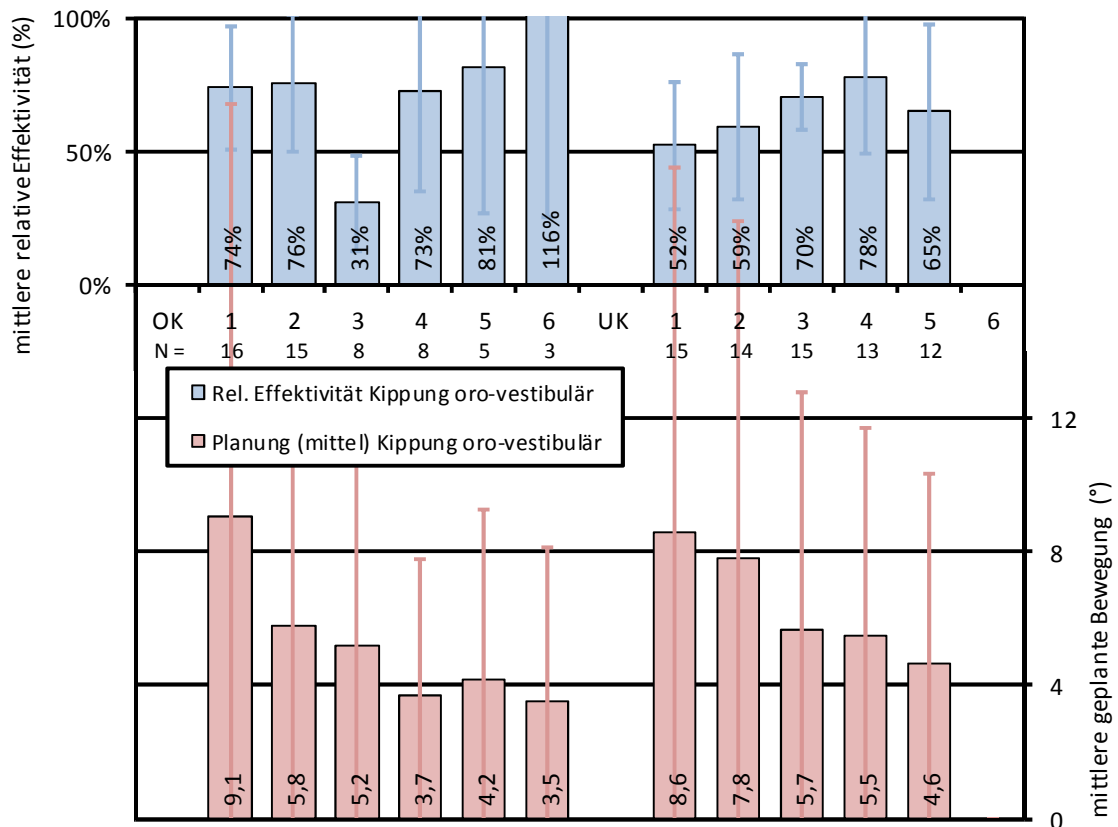


Abbildung 33: Säulendiagramm zur Darstellung der relativen Effektivität der Zahnbewegungen bei der Patientengruppe A. Es zeigt die Rotation um die y-Achse, d.h. Kippungen der Krone nach oral- bzw. vestibulär. Die oberen Säulen geben für jeden Zahntypen die relative Effektivität sowie den Fehler in Prozent an. Die unteren Säulen zeigen die mittlere geplante Bewegung in Grad sowie die Standardabweichung an. Die Anzahl N der für die jeweiligen Mittelwerte verwendeten Datensätze ist jeweils unterhalb der Zahntypen aufgelistet.

Die ersten Inzisivi des OK und UK zeigten deutlich höhere mittlere geplante Bewegungen von 9,1° und 8,6°, wobei die OK-Zähne mit 74 % eine hohe Effektivität aufwiesen und die UK-Zähne nur eine mäßige (52 %) Effektivität erzielten. Eine weitere mäßige Effektivität zeigte sich bei den UK-2ern (59 %) und 5ern (65 %). Die OK-3er zeigten, bei geringem Fehlerbalken, nur eine Unterkorrektur, bei einer mittleren geplanten Bewegung von 5,2°. Ansonsten zeigten sich die Ergebnisse stabil bei einer hohen Effektivität zwischen 70 % und 81 %.

Im Diagramm der Abbildung 34 wird die Effektivität dargestellt, mit der die Rotation um die Zahnlongsachse, also mesiale und distale Rotationen, durchgeführt werden kann.

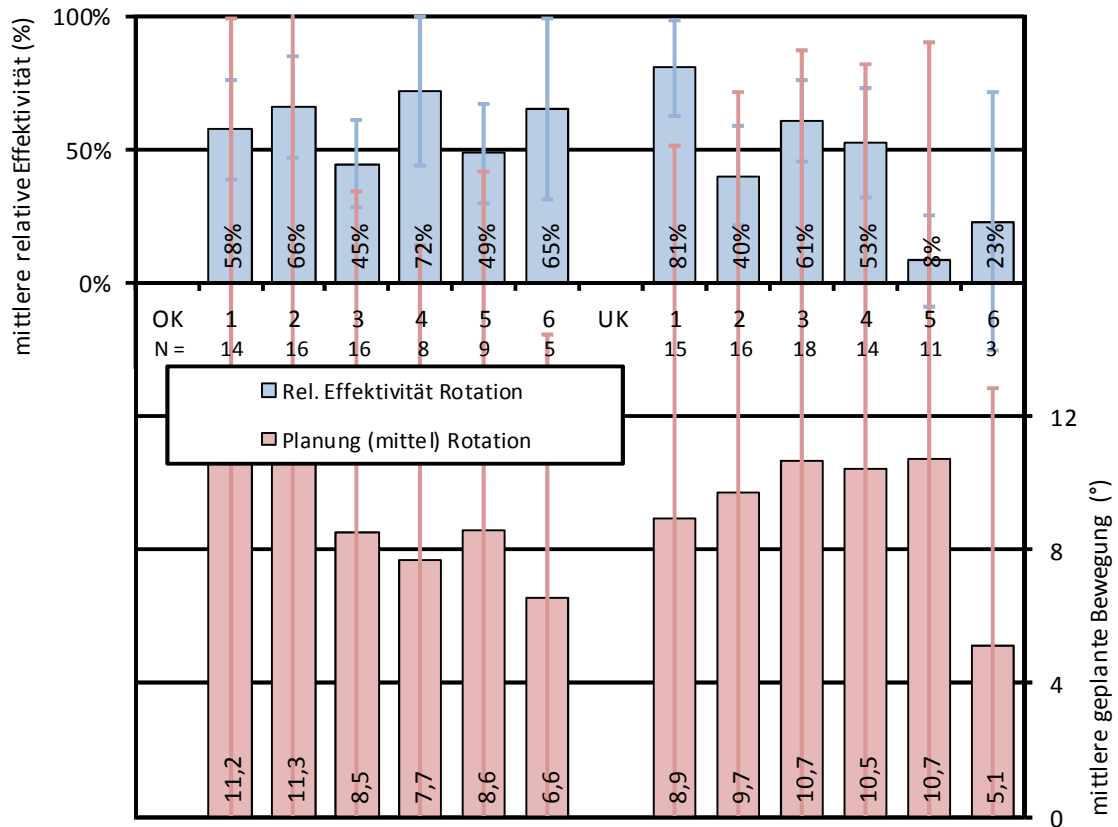


Abbildung 34: Säulendiagramm zur Darstellung der relativen Effektivität der Zahnbewegungen bei der Patientengruppe A. Es zeigt die Rotation um die z-Achse, d.h. eine Rotation um die Zahn längsachse. Die oberen Säulen geben für jeden Zahntypen die relative Effektivität sowie den Fehler in Prozent an. Die unteren Säulen zeigen die mittlere geplante Bewegung in Grad sowie die Standardabweichung an. Die Anzahl N der für die jeweiligen Mittelwerte verwendeten Datensätze ist jeweils unterhalb der Zahntypen aufgelistet.

Auffällig ist, dass hohe mittlere Bewegungen bis zu 11,2° geplant worden sind. Auch die Anzahl der gewerteten Daten war in der OK Front sowie dem gesamten UK, mit Ausnahme der Molaren, zwischen 11 bis 14 relativ hoch. Die UK-Molaren zeigten mit nur drei gewerteten Daten, einer mittleren geplanten Bewegung von 5,1° nur eine Unterkorrektur von 23 %. Auch die zweiten Prämolaren des UK und zweiten Inzisivi erreichten nur mit 8 % und 40 % die geplante Rotation. Im OK wurden die 3er und 5er nur knapp unterkorrigiert (45 % und 49 %). Nur die OK-4er schafften es mit 72 % und die UK-1er mit 81 % in den Bereich der hohen Effektivität. Alle weiteren Zahngruppen konnten nur ein mäßiges Ergebnis aufweisen.

4.5 Statistische Auswertung

4.5.1 Vergleich zwischen Ergebnissen der Patientengruppe A und T

In Tabelle 1 sind die Ergebnisse des t-Tests dargestellt. Als Signifikanzniveau wurde in allen Tests ein Wert von 0,05 verwendet. Es wurde die Effektivität der durchgeführten Bewegungen entlang oder um eine Achse (Tx bis Rz) der zwei Patientengruppen verglichen. Hierbei wurde zwischen den einzelnen Zähnen des OK und UK unterschieden. Im Vergleich der Effektivität der zwei verschiedenen Gruppen T und A konnten vereinzelt signifikante Unterschiede festgestellt werden. Vor allem in der Extrusionsbewegung Tz (Ex) des UK konnten Unterschiede bei den Prämolaren festgestellt werden. Die Intrusi-

Tabelle 1: Die Tabelle zeigt die ermittelten p-Werte des t-Tests zwischen den errechneten Effektivitäten der A- und T-Patientengruppen. Es wurde zwischen den Bewegungsrichtungen und Zahntypen unterschieden. Die Berechnungen erfolgten mit einem Signifikanzniveau von 0,05. Zu geringe Datenmengen wurden mit einem „/“, Werte, die nach der Bonferroni-Holm-Korrektur eine Signifikanz aufweisen, mit einem „*“ gekennzeichnet.

p-Wert	Tx	Ty	Tz (In)	Tz (Ex)	Rx	Ry	Rz
1er OK	0,62	0,49	0,97	/	0,46	0,5	0,91
2er OK	0,61	0,68	0,31	0,94	0,49	0,9	0,99
3er OK	0,95	0,1	0,31	0,86	0,94	0,74	0,59
4er OK	0,62	0,28	/	0,33	0,31	0,31	0,82
5er OK	0,36	0,86	/	0,44	0,28	0,66	0,99
6er OK	0,09	0,11	/	/	/	/	0,02
1er UK	0,27	0,75	0,11	/	0,33	0,58	0,57
2er UK	0,96	0,61	0,68	/	0,91	0,59	0,15
3er UK	0,48	0,38	0,14	0,53	0,24	0,31	0,88
4er UK	0,44	0,71	/	0,04	0,25	0,38	0,65
5er UK	0,92	/	/	<0,01*	0,7	0,34	0,03
6er UK	0,38	0,46	/	/	/	/	/

onsbewegung T (In) konnte bei diesen Zahntypen nicht verglichen werden, da unzureichende Datenmengen vorlagen. Weitere signifikante Unterschiede fanden sich in der Rotationsbewegung um die zahneigene Achse (Rz) bei den 5ern des UK sowie den 6ern des OK. Ebenfalls fallen die 6er des OK in der Translation nach oro-vestibulär (Tx) mit einem statistisch signifikanten Wert auf. Nach der Korrektur mittels Bonferroni-Holm-Prozedur konnten lediglich bei der Extrusionsbewegung Tz (Ex) der 5er des UK ein statistisch signifikanter Unterschied festgestellt werden. Da die Anzahl der statistisch wichtigen Unterschiede so gering war, kann in der Gesamtheit davon ausgegangen werden, dass die Unterschiede keine statistische Signifikanz aufwiesen.

Tabelle 2: Die Tabelle zeigt die ermittelten p-Werte des t-Tests zwischen den errechneten Effektivitäten des OK und UK. Es wurde zwischen den Bewegungsrichtungen und Zahntypen unterschieden. Die Berechnungen erfolgten mit einem Signifikanzniveau von 0,05. Zu geringe Datenmengen wurden mit einem „/“ gekennzeichnet. Nach der Bonferroni-Holm-Korrektur zeigte sich kein signifikanter Wert.

OK zu UK	Tx	Ty	Tz (In)	Tz (Ex)	Rx	Ry	Rz
1er	0,91	0,63	0,16	0,77	0,40	0,23	0,64
2er	0,39	0,50	0,52	0,24	0,16	0,12	0,86
3er	0,10	0,11	0,92	0,56	0,95	0,19	0,55
4er	0,39	0,90	/	0,24	0,23	0,73	0,14
5er	0,71	0,80	/	0,07	0,58	0,98	0,28
6er	0,98	0,81	/	0,01	/	0,96	0,49

Beim Vergleich der einzelnen Zahntypen zwischen OK und UK zeigten sich ähnliche Werte. In Tabelle 2 ist zu erkennen, dass lediglich die Extrusionsbewegung der ersten Molaren sich signifikant zwischen den beiden Kiefern unterschieden. Nach der Durchführung der Bonferroni-Holm-Korrektur zeigte dieser Wert ebenfalls keinen signifikanten Unterschied. Auch hier reichte die Datenmenge der Intrusionsbewegungen bei den Molaren und Prämolaren nicht aus, um eine Aussage treffen zu können.

4.5.2 Vergleich der Ergebnisse der Zahngruppen untereinander

Im Vergleich der Effektivität der OK-Inzisivi und -Prämolaren zeigten sich in vereinzelter Bewegungsrichtungen signifikante Unterschiede. Sowohl in der Intrusionsbewegung und in der Extrusionsbewegung als auch nach mesial und distal waren signifikante Unterschiede festzustellen (Tabelle 3). Es ist zu erwähnen, dass durch den Zusammenschluss der Prämolaren in der Intrusionsrichtung erst eine ausreichende Datenmenge vorlag.

Tabelle 3: Ergebnisse des t-Tests mit einem gewählten Signifikanzniveau von 0,05. Vergleich der Effektivitäten der einzelnen Zahngruppen des OK und einzelnen Bewegungsrichtungen. Zu geringe Datenmengen wurden, mit einem „/“, Werte, die nach der Bonferroni-Holm-Korrektur eine Signifikanz aufweisen, mit einem „*“ gekennzeichnet.

OK	Tx	Ty	Tz (In)	Tz (Ex)	Rx	Ry	Rz
Inzisivi							
Canini	0,31	0,04	0,38	0,53	0,96	0,01	0,49
Prämolaren	0,80	0,85	0,04	0,05	<0,01*	0,99	0,72
Molaren	0,80	0,24	/	0,19	0,53	0,89	0,19
Canini							
Prämolaren	0,28	0,16	0,11	0,22	0,01	0,13	0,40
Molaren	0,77	0,02	/	0,32	0,67	0,19	0,65
Prämolaren							
Molaren	0,74	0,32	/	0,57	0,04	0,94	0,21

Die Canini unterschieden sich in ihrer Effektivität im OK signifikant in Bezug auf die Translationsbewegung nach mesial bzw. distal (Ty) von denen der 6er und Inzisivi.

Im Vergleich zu den Inzisivi zeigten sich auch signifikante Unterschiede in der Kippung nach oral und vestibulär. Die Molaren des OK konnten im Vergleich mit den Prämolaren in der Effektivität der Kippung nach mesial und distal (Rx) ebenfalls signifikante Unter-

schiede aufweisen. Betrachtet man die Ergebnisse der Auswertung des UK (Tabelle 4), so stellt man dort keine signifikanten Unterschiede zwischen den Zahngruppen fest. In der Gesamtheit sind somit keine deutlichen Unterschiede zu erkennen, sodass nicht von einer statistischen Signifikanz ausgegangen werden kann. Diese Aussage wird auch durch die Ergebnisse der Bonferroni-Holm-Korrektur gestützt. Nach deren Durchführung zeigte lediglich die Kippung der OK-Prämolaren nach mesial und distal (RX) einen signifikanten Unterschied.

Tabelle 4: Ergebnisse des t-Tests mit einem gewählten Signifikanzniveau von 0,05. Vergleich der Effektivitäten der einzelnen Zahngruppen des UK und einzelnen Bewegungsrichtungen. Zu geringe Datenmengen wurden mit einem „/“ gekennzeichnet. Nach der Bonferroni-Holm-Korrektur zeigte sich kein signifikanter Wert.

UK	Tx	Ty	Tz (In)	Tz (Ex)	Rx	Ry	Rz
Inzisivi							
Canini	0,26	0,74	0,43	0,10	0,42	0,54	0,83
Prämolaren	0,07	0,59	0,99	0,10	0,39	0,32	0,83
Molaren	0,93	0,07	/	0,58	/	0,53	0,13
Canini							
Prämolaren	0,53	0,82	0,74	0,31	0,70	0,77	0,98
Molaren	0,41	0,11	/	0,10	/	0,13	0,84
Prämolaren							
Molaren	0,21	0,39	/	0,19	/	0,89	0,21

Es wurde ein weiterer t-Test durchgeführt, in dem die Ergebnisse der Zahngruppen des OK mit denen des UK verglichen wurden. Hierbei wurden ebenfalls nur vereinzelte signifikante Unterschiede festgestellt, weswegen auf eine weitere Darstellung verzichtet wird.

4.5.3 Vergleich der Ergebnisse von mehrwurzeligen und einwurzeligen Zähnen

Werden die Ergebnisse von ein- und mehrwurzeligen Zähnen des Oberkiefers verglichen, stellt sich nur ein signifikanter Unterschied in der Kippung nach mesial und distal heraus (Tabelle 5). Nach der Bonferroni-Holm-Korrektur zeigte auch diese Bewegung keine Signifikanz. Im UK sind aufgrund einer geringen Anzahl der Datensätze bei den mehrwurzeligen Zähnen in den Bewegungsrichtungen Rx und Tz (In) keine Aussagen zu treffen. Die restlichen Bewegungsrichtungen zeigten keine signifikanten Unterschiede an. Gleiches galt auch für den Vergleich der mehrwurzeligen Zähne des OK und UK zu den einwurzeligen Zähnen beider Kiefer.

Tabelle 5: Ergebnisse des t-Tests mit einem gewählten Signifikanzniveau von 0,05. Vergleich zwischen mehr- und einwurzeligen Zähnen der jeweiligen Kiefer sowie beider Kiefer und jeweiliger Bewegungsrichtung. Zu geringe Datenmengen wurden mit einem „/“ gekennzeichnet. Nach der Bonferroni-Holm-Korrektur zeigte sich kein signifikanter Wert.

p-Wert	Tx	Ty	Tz (In)	Tz (Ex)	Rx	Ry	Rz
	Mehrwurzelige Zähne OK						
Einwurzellige Zähne OK	0,77	0,18	0,06	0,31	0,04	0,27	0,13
	Mehrwurzelige Zähne UK						
Einwurzelige Zähne UK	0,46	0,15	/	0,26	/	0,69	0,16
	Mehrwurzelige Zähne OK und UK						
Einwurzelige Zähne OK und UK	0,48	0,08	0,27	0,63	0,11	0,17	0,50

5. Diskussion

In der vorliegenden Studie zeigte sich, dass verschiedene Zahnbewegungen mit Alignern unterschiedlich gut durchführbar sind. Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse der Studie mit den Resultaten vorangegangener Untersuchungen verglichen und diskutiert sowie die Methode kritisch betrachtet. Bei der Betrachtung der Ergebnisse ist darauf zu achten, dass die Auswahl der Patienten durch erfahrende Behandler durchgeführt wurde. Sie geben an, dass die Patienten visuell erfolgreich behandelt wurden. Durch das Festlegen eines digitalen Behandlungsziels sorgt Invisalign® dafür, dass ein definiertes Endergebnis feststeht. Dieses sehr definierte Ziel steht für die meisten konventionellen Behandlungsmethoden nicht zur Verfügung, weswegen dort eine so exakte Analyse zur Effektivität durch den Vergleich des Behandlungsergebnisses mit einem vorher festgelegten Behandlungsziel nicht durchführbar ist.

5.1 Diskussion der Ergebnisse

Translationen in oraler bzw. vestibulärer Richtung (Tx) sind bei der mit Invisalign®-Teen behandelten Patientengruppe T im UK mit hoher bis sehr hoher Effektivität durchführbar. Diese Ergebnisse werden durch die Studie von Kravitz (2009) gestützt. Sie zeigt, dass diese Bewegung am besten durchführbar zu sein scheint. Die Effektivität erreicht bei den geprüften Frontzähnen allerdings nur 41 % im Mittel. Abgesehen von den UK-6ern, die eine mäßige Effektivität aufweisen, zeigt die Patientengruppe A ein identisches Bild. Canini und Molaren des OK scheinen in dieser Bewegungsrichtung in beiden Patientengruppen eher schwieriger bewegbar zu sein als die restlichen OK-Zahntypen.

Besonders große Translationsbewegungen nach mesial und distal sind bei einem Lückenschluss nach Extraktionen nötig. Bei Auflösungen von Engständen werden eher kleinere Bewegungen benötigt. Miller et al. (2002) und Giancotti et al. (2015) sprechen von guten Ergebnissen beim Lückenschluss nach Extraktion eines UK- Frontzahns, wogegen Baldwin et al. (2008) eher eine Kippung von Prämolaren in die Extraktionslücke feststellen konnte. In dieser Arbeit wurde nicht zwischen Extraktionsfällen und Auflö-

gen von Engständen unterschieden, weswegen nicht nur von großen Bewegungen ausgegangen wurde. Die mittlere geplante Bewegung bleibt meistens unter 1 mm. Innerhalb der Patientengruppe T im Seitenzahnbereich konnte nur eine mäßige Effektivität und Unterkorrekturen im OK festgestellt werden, die 1er beider Kiefer erscheinen jedoch gut bewegbar zu sein. Auch bei der Patientengruppe A sind ähnliche Ergebnisse zu finden. Ob die geringere Effektivität im Seitenzahnbereich dadurch bedingt wird, dass die Bewegung durch eine kippende Bewegung nach mesial oder distal vorgetäuscht wird, kann in dieser Studie nicht grundlegend festgestellt werden, da keinerlei röntgenologische Unterlagen vorlagen. Betrachtet man dennoch die Kippung der Zahnkronen nach mesial bzw. distal, so zeigen in dieser Untersuchung die mandibulären lateralen Inzisivi und Canini mit 36 %, und 48 % sowie die Prämolaren eine Unterkorrektur bei der Betrachtung der gesamten Patientendaten. Auch in der Untersuchung von Kravitz et al. (2009) wird diese Aussage gestützt. Hier erreichen die mandibulären Canini nur 27 % Genauigkeit. In der Gruppe der mit Invisalign®-Teen behandelten Patienten zeigt sich eine mäßige Effektivität von durchschnittlich 61 % und bei der Erwachsenengruppe eine Unterkorrektur mit 41 %. Bei den Untersuchungen von Hauschopp (2012) zeigten sich sogar Werte einer hohen Effektivität von 116 %. Die maxillären zweiten Prämolaren werden mit -69 % und die ersten Molaren mit -40 % Effektivität bewegt und scheinen laut Hauschopp nicht kontrollierbar zu sein. In der vorliegenden Untersuchung erscheinen die Prämolaren ebenfalls unterkorrigiert (5 % bis 36 %). Eine weitere Verstärkung der Bewegung durch Attachments oder ähnliche Hilfsmittel sollte hier bedacht werden.

Vertikale Bewegungen im Sinne von Intrusionen und Extrusionen zeigen sehr unterschiedliche Ergebnisse. Betrachtet man die Resultate der gesamten Patientendaten dieser Untersuchung, werden die OK-2ern und -3ern bei der Intrusion mit 44 % und 43 % erreichter Effektivität nur unterkorrigiert. Die Studie von Kravitz et al. (2009) zeigten ein ähnliches Ergebnis, mit einer durchschnittlichen Genauigkeit von 41 %. Die Ergebnisse der mit Invisalign®-Teen behandelten Gruppe, mit zwischen -17 % und 7 % Effektivität bei der Intrusion, ebenfalls ein schlechteres Ergebnis. Auch Krieger et al. (2012) geben an, dass die vertikale Bewegung in der Front nur schwierig durchführbar sei. Diese Probleme der vertikalen Einstellung zeigen sich auch in einer Studie von Kassas et al. (2013). Laut ihren Ergebnissen verschlechtern sich die okklusale Kontakte und Beziehungen nach der Behandlung mit Alignern. Inwiefern sich die okklusale Beziehungen

verändert haben, kann in dieser Untersuchung nicht festgestellt werden, da eine Positionierung der Kiefer gegeneinander nicht stattgefunden hat. Die Patientengruppe A erreicht im Vergleich zur Gruppe T eine mäßige Effektivität bei der Intrusion der OK-2er und -3er. Im UK zeigen die Resultate dieser Untersuchung eine höhere Effektivität der UK-Canini von zwischen 56 % und 79 %. In der Untersuchung von Kravitz et al. (2009) erreichen diese nur eine Effektivität von 40 %. Die Extrusionsbewegungen ergeben bei den UK-Inzisivi in dieser Untersuchung einen Wert zwischen 78 % und 83 %, wogegen Kravitz et al. (2009) nur von Werten zwischen 28 % und 30 % sprechen. Die UK-Zähne der mit Invisalign®-Teen behandelten Patienten sind mit einer höheren Effektivität extrudiert worden als die Zähne der Erwachsenenengruppe. Die Werte im UK liegen bei den ersten Prämolaren bei 67 %, bei den zweiten Prämolaren bei 69 %, gegenüber 1 % und -24 % bei den Erwachsenen. Dies könnte an der Tatsache liegen, dass bei den Invisalign®-Teen Patienten auf die Wachstumsbewegungen geachtet werden muss (Invisalign®, URL: www.invisalign.de/de/what-is-invisalign/Pages/Teen-Braces.aspx, aufgerufen am: 15.07.2015). Fraglich ist hier, ob eine aktive Extrusion der Zähne stattgefunden hat oder ob der natürliche Zahndurchbruch für die Positionierung verantwortlich war. Durch die sinnvolle Trennung der In- und Extrusionsbewegungen ist die Datenanzahl erheblich gesunken. Aus diesem Grund sind Aussagen zu einigen Zahntypen nicht möglich. Mit einer höheren Anzahl von Patientendaten könnten diese Untersuchungen in Zukunft noch fortgeführt werden.

In der Durchführbarkeit der Kippung nach oral und vestibulär zeigen sich besonders Schwierigkeiten bei der Kippung der maxillären Canini in allen Patientengruppen (22 % bis 31 %), wogegen die UK-Canini hohe bzw. sehr hohe Effektivität aufweisen (70 % bis 92 %). Das Resultat des t-Test (Kapitel 4.5.1.) zeigt jedoch in allen Bewegungsrichtungen keine so deutlichen Unterschiede zwischen den einzelnen Zahntypen der beiden Kiefern, als dass sie als signifikant erscheinen. Ob die lange Wurzel des OK-3ers eine Rolle spielt ist somit fraglich. Auch Kravitz et al. (2009) gehen eher davon aus, dass die Kronenform eine wichtigere Rolle als die Wurzel spielt. Die lateralen Inzisivi des UK der Gruppe T werden mit 46 % knapp unterkorrigiert. Die restlichen Zähne zeigen durchweg mäßige bis hohe Effektivitäten. Kassas et al. (2013) und auch Krieger et al. (2012) stellten diese gute Durchführbarkeit von Protrusionsbewegungen bzw. Kippungen nach oro-vestibulär ebenfalls fest. In der Untersuchung von Kravitz et al. (2009) erreicht diese

Bewegungsrichtung allerdings nur zwischen 40 % und 47 % Effektivität. Im Vergleich zu Bracketbehandlungen zeigten Djeu et al. (2005), dass signifikante Unterschiede bei der bukkolingualen Inklination aufzufinden sind.

Bei der Untersuchung von Rotationen der Eckzähne sowie des Einflusses von Attachments und interdentaler Schmelzreduktion zeigte sich bei Kravitz et al. (2008) eine Effektivität von durchschnittlich 36 %. In einer späteren Untersuchung von 37 Patienten zeigte sich eine ähnliche Genauigkeit der Rotationsbewegung von 32 % in der Maxilla sowie 29 % für die mandibulären Canini (Kravitz et al., 2009). Sie wiesen darauf hin, dass Rotationen der Eckzähne über 15° eine signifikante Reduzierung der Effektivität zeigten, was von Simon et al. (2014) bestätigt wurde. Im Vergleich hierzu erscheinen die Ergebnisse der vorliegenden Studie mit durchschnittlich 48 % im OK sowie 64 % im UK mit einer höheren Effektivität, wobei die mittlere geplante Bewegung auch unter 15° bei 8,4° bis 11,1° lag. Auch bei Hauschopp (2012) zeigte sich eine mäßige bis hohe Effektivität von 63 % bis 81 % im Bereich der Frontzähne. Die maxillären ersten Prämolaren zeigten bei den gesamten Patientendaten eine hohe Effektivität (70 %). Sowohl die 5er des OK als auch die 4er des UK zeigten eine mäßige Effektivität, wobei die zweiten Prämolaren des UK nur unterkorrigiert wurden (29 %). In der Untersuchung von Simon et al. (2014) wurden im Durchschnitt bei den Prämolaren ähnliche Ergebnisse erzielt (40 %). Auch hier wurde, wie auch bei Kravitz et al. (2008, 2009), auf den großen Einfluss von Attachments hingewiesen. Inwiefern die Verwendung unterschiedlicher Attachments die Ergebnisse dieser Studie beeinflusst hätten, kann nicht festgestellt werden.

5.2 Diskussion der Methode

Bei der Auswahl der Modelle wurde darauf geachtet, dass in der Planung nicht alle Zähne in die aktive Behandlung mit einbezogen worden sind. Die Überlagerung der Modelle wurde dann anhand dieser unbewegten Referenzstruktur durchgeführt. Sollte diese Referenzstruktur nur in einem Quadranten vorhanden gewesen sein, kann dies zu höheren Fehlern geführt haben. Kleinere Kippungen bedingt durch geringe Ungenauigkeiten im Bereich der Referenzstruktur können dann zu großen Veränderungen in der Überlage-

rung im gegenüberliegenden Quadranten geführt haben. Auch eine minimale ungewollte Bewegung der Referenzzähne kann das Ergebnis des Matchings beeinflusst haben. So spricht Melkos (2005) von leichten Intrusionen der Zähne im hinteren Bereich von 0,25 mm - 0,50 mm, die durch die Schienen ungewollt zustande kommen. Diese durch die Dicke der Schienen bedingte Intrusion, die sich nach einer Retentionszeit wieder zurückbilden soll (Melkos, 2005), kann Fehler im Matching hervorrufen, die vor allem die Ergebnisse der In- und Extrusion beeinflussen.

Um das Matching durchführen zu können, wurde manuell eine Segmentierung der Zähne innerhalb der Surfacer-Software durchgeführt. Es ist nicht auszuschließen, dass die dadurch resultierenden minimalen Unterschiede der korrespondierenden Zahnsegmente einen Einfluss auf das Matching ausüben. Ein weiterer wichtiger Punkt ist die genaue Abformung der einzelnen Strukturen um ein genaues Matching durchführen zu können.

Es wurden Modelle aussortiert, die durch Defekte oder Ungenauigkeiten nicht eindeutig überlagert werden konnten. Trotz großer Sorgfalt in der Auswahl der Modelle kann nicht ausgeschlossen werden, dass durch Lagerungsschäden des Abdrucks oder Expansion des Gipses das Matching beeinflusst wurde. Es ist anzumerken, dass diese Fehler durch die Verwendung von Intraoralscannern gegebenenfalls reduziert werden könnten.

In dieser Untersuchung wurden digitale ClinCheck[®]- Modelle mit digitalisierten Gipsmodellen der Anfangs- und Endsituationen bearbeitet. Es ist nicht festzustellen, ob durch die Ungenauigkeiten bedingt durch das Scannen eine Verfälschung stattgefunden hat, die diese Untersuchungen beeinflusst. Die Gipsmodelle der Patientengruppe T wurden von Align Technology Inc. eingescannt, wogegen die Modelle der Gruppe A wie zuvor beschrieben selbst digitalisiert wurden. Durch den oben erwähnten Intraoralscan könnte diese Fehlerquelle ebenfalls minimiert werden.

5.3 Diskussion der Ergebnisse in Bezug auf die klinische Bedeutung

Die Ergebnisse der vorliegenden Studie zeigen, dass verschiedene Fehlstellungen der Zähne mit Hilfe der Aligner-Therapie effektiv korrigiert werden können. Die Translation der Zähne in oro-vestibuläre Richtung erwies sich als besonders gut durchführbar. Kipungen nach mesial oder distal schienen jedoch nur schwierig durchführbar zu sein. Als problematisch wird häufig die Extrusionsbewegung angesehen (Hauschopp 2012; Kravitz et al., 2009). Es stellte sich in dieser Studie heraus, dass vor allem die mit Invisalign®-Teen behandelten Patienten etwas bessere Ergebnisse in dieser Bewegungsrichtung aufwiesen. Ob dies der speziell dem Wachstum angepassten Behandlungsmethode oder rein durch die wachstumsbedingte Extrusion der Zähne geschuldet ist, ist wie bereits erwähnt, nicht genau festzustellen. Prinzipiell konnte kein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Behandlungsmethoden festgestellt werden. Ob der blaue Indikatorpunkt, der auf den Invisalign®-Teen-Alignern abgedruckt ist, wie von Tuncay et al. (2009) beschrieben, zu einer Compliance-Steigerung führt, konnte in dieser Studie nicht überprüft werden.

Grundsätzlich ist der Erfolg der herausnehmbaren kieferorthopädischen Therapie, also auch die Aligner-Therapie, stark abhängig von der Tragedauer und somit auch von der Mitarbeit des Patienten (Boyd, 2008). Da die ästhetischen und phonetischen Einschränkungen bei der Behandlung mit durchsichtigen Kunststoffschienen wesentlich geringer erscheinen, als bei herkömmlichen Verfahren (Joffe, 2003; Miller et al., 2007; Nedwed und Miethke, 2005; Shalish et al., 2012), kann meist von einer hohen Compliance des Patienten ausgegangen werden. Durch die Möglichkeit des Herausnehmens kann die häusliche Mundhygiene deutlich einfacher durchgeführt werden als bei festsitzenden Apparaturen (Azaripour et al., 2015; Karkhanechi et al., 2013; Miethke und Brauner, 2007; Tuncay et al., 2013). Aus diesem Grund wird die Gefahr von Demineralisierungen und Karies während der Behandlung deutlich reduziert sowie das parodontale Gewebe geschont (Karkhanechi et al., 2013; Schupp und Haubrich 2010c; Turatti et al., 2006). Auch unerwünschte Nebenwirkungen von Multibandbehandlungen, wie Schmelzabrasionen durch Bracketkontakt und Schmelzläsionen durch die Entfernung von Brackets, können somit reduziert werden (Schupp und Haubrich, 2010c). Lediglich die Befestigung

von Attachments an vereinzeltten Zähnen ist für die Aligner-Behandlung je nach geplanter Zahnbewegung unabdinglich (Bourauel et al., 1997; Kou und Hordt, 2001; Kravitz et al., 2008).

Ein Nachteil der Aligner-Therapie ist die eher geringe Eingreifmöglichkeit des Behandlers während einer laufenden Therapie (McKenna, 2001). Umso wichtiger ist es, dass durch regelmäßige Therapiekontrollen der Behandlungsverlauf kontrolliert und gegebenenfalls die Tragedauer der einzelnen Schienen verlängert wird sowie ein eventuell nötiges „Case Refirment“ eingeleitet werden kann (Womack, 2006).

Als weitere Schwäche der Aligner-Therapie wird der Lückenschluss nach einer Prämolarenextraktion beschrieben (Göz, 2010). Es wird angegeben, dass der körperliche Versatz des Zahnes durch eine kippende Bewegung vorgetäuscht wird (Baldwin et al., 2008; Bollen et al., 2003). Da in der vorliegenden Studie nur die Bewegungen der Zahnkronen untersucht wurde, kann diese Feststellung weder gestützt noch widerlegt werden. Göz (2010) gibt ebenfalls an, dass die Rotation einzelner Zähne nur bedingt möglich sei, was auch in der Studie von Kravitz et al. (2009) bestätigt wurde. In dieser Studie zeigte sich jedoch vor allem bei den Canini eine höhere Effektivität erreicht wurde (45 % bis 67 %).

Beim Vergleich der Effektivität von ein- und mehrwurzeligen Zähnen zeigte sich in der vorliegenden Studie, keinen signifikanten Unterschiede. Man kann deshalb allgemein davon ausgehen, dass die Zähne unabhängig von ihrer Wurzelanzahl bewegt werden können.

Betrachtet man die genannten Vor- und Nachteile der Aligner-Therapie, so erscheint diese als gute Alternative zur Behandlung von Zahnfehlstellungen. Der ästhetisch anspruchsvolle Patient kann so unter Berücksichtigung der Indikationsstellung und Limitationen des Systems kieferorthopädisch mit einem herausnehmbaren Gerät erfolgreich behandelt werden.

6. Zusammenfassung

Eine Möglichkeit, dem Wunsch der ästhetisch unauffälligen Kieferorthopädie nachzukommen, ist die Behandlung mit einer Reihe durchsichtiger Kunststoffschienen, den Alignern. Diese bieten einen hohen Tragekomfort und erfüllen ästhetische Ansprüche. In der Literatur wird immer wieder kontrovers über das Indikationsspektrum der Aligner-Systeme diskutiert. Aus diesem Grund stellt sich die Frage nach der Effektivität, mit der die Aligner die Zähne positionieren. Es ist zu hinterfragen, ob bei bestimmten Zahntypen Bewegungen besser durchführbar sind als bei anderen. Unterscheidet sich vielleicht die Effektivität aufgrund der unterschiedlichen Knochengegebenheiten des OK und UK oder der Anzahl der Zahnwurzeln?

Um diese Fragen zu beantworten, wurden in dieser Studie die digitalen Modelle der intraoralen Anfangs- und Endsituation jeweils mit den ClinCheck[®]-Planungsmodellen überlagert und die geplante mit der klinisch erzielten Bewegung verglichen. Die daraus errechnete Effektivität bezieht sich auf Translationen und Rotationen in allen drei Raumebenen. Es standen 18 Datensätze von Patienten zur Verfügung, die mit Invisalign[®] für Patienten mit abgeschlossenem Zahnwachstum (Gruppe A) behandelt worden sind sowie 17 Datensätze von Patienten mit Wechselgebiss, die mit Invisalign[®] Teen (Gruppe T) behandelt wurden. Alle genutzten Aligner wurden aus dem Material Ex 30 hergestellt. Mit Hilfe der angewendeten Methode konnten erfolgreich die Bewegungen der einzelnen Zähne analysiert und die daraus resultierende Effektivität festgestellt werden. Als Referenzwerte wurden bei der Überlagerung der Modelle Zähne gewählt, die während der kieferorthopädischen Behandlung nicht bewegt werden sollten.

Die Ergebnisse beider Gruppen unterschieden sich in der Gesamtheit nicht signifikant voneinander. Bei den Translationen nach oro-vestibulär zeigten sich besonders gute Ergebnisse bei den Prämolaren des UK (91 % bis 98 %). Die Translationen nach mesial oder distal waren bei den ersten Inzisivi des UK mit einer hohen Effektivität (70 % bis 84 %) durchführbar. Die schlechtesten Ergebnisse zeigten die Molaren und zweiten Prämolaren (-3 % bis 47 %) des UK sowie die Molaren des OK (-35 %) bei Gruppe T. Die Intrusionsbewegung fand meist nur mit mäßiger Effektivität oder Unterkorrektur statt, mit Ausnahme der UK-4ern der Gruppe A und der UK Canini der Gruppe T (79 % und

81 %). Die Ergebnisse der Extrusionsbewegung ergaben im OK nur Unterkorrekturen der Zähne (-17 % bis 42 %). Im UK unterschieden sich die Ergebnisse der Prämolaren der Gruppen T und A deutlich (Gruppe A: -24 % und 1 %, Gruppe T: 67 % und 69 %). Aufgrund geringer Datenmengen für diese Bewegung und Zahngruppe ist die Aussagekraft dieser Ergebnisse fraglich. Die Kippungen nach oro-vestibulär waren mit den OK-Canini nur schlecht durchführbar (22 % bis 31 %), wogegen die restlichen Zähne meist Werte größer als 70 % zeigten. Bei der Kippung nach mesial oder distal zeigten die Zähne in allen Patientengruppen eine mäßige Effektivität oder Unterkorrektur (-17 % bis 65 %). Mesiale und distale Rotationen der Zähne zeigten Ergebnisse von 23 % bis 81 %. Der Vergleich zwischen mehr- und einwurzeligen Zähne sowie UK- und OK-Zähnen zeigte keine Unterschiede, die als signifikant gelten würden. Die Bewegungen in koronal-apikaler Richtung und Kippungen nach mesial und distal scheinen am wenigsten gut durchführbar zu sein.

Die Ergebnisse zeigen, dass Translationen nach oro-vestibulär am effektivsten durchgeführt werden konnten. Die Therapie mit Alignern scheint unter Berücksichtigung der einzelnen Limitationen des Systems eine gute Möglichkeit zur Behandlung von Malokklusionen zu sein. Auch komplexe Fehlstellungen sind mit genauer diagnostischer Planung sowie fundierte Kenntnisse über das Therapieverfahren zufriedenstellen zu beheben.

7. Literaturverzeichnis

Almeida MA, Phillips C, Kula K, Tulloch C. Stability of the palatal rugae as landmarks for analysis of dental casts. *Angle Orthod* 1995; 65: 43–48

Andersen C, Schramm E. The bioplast positioner - a new production method. *J Clin Orthod* 1976; 10: 692–697

Azaripour A, Weusmann J, Mahmoodi B, Peppas D, Gerhold-Ay A, Noorden CJV, Willershausen B. Braces versus Invisalign®: gingival parameters and patients' satisfaction during treatment: a cross-sectional study. *BMC Oral Health* 2015; 15: 69

Baldwin DK, King G, Ramsay DS, Huang G, Bollen AM. Activation time and material stiffness of sequential removable orthodontic appliances. Part 3: Premolar extraction patients. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2008; 133: 837–845

Bollen AM, Huang G, King G, Hujoel P, Ma T. Activation time and material stiffness of sequential removable orthodontic appliances. Part 1: Ability to complete treatment. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2003; 124: 496–501

Bourauel C, Drescher D, Wolter H. Können die Kraftsysteme von Positionern durch den zusätzlichen Einsatz von Attachments beeinflusst werden? Eine experimentelle Studie. *Kieferorthop* 1997; 11: 183–190

Boyd RL, Miller R, Vlaskalic V. The Invisalign system in adult orthodontics: mild crowding and space closure cases. *J Clin Orthod* 2000; 34: 203–213

Boyd RL, Waskalic V. Three-dimensional diagnosis and orthodontic treatment of complex malocclusions with the invisalign appliance. *Semin Orthod* 2001; 7: 274–293

Boyd RL, Oh H, Fallah M, Vlaskalic V. An update on present and future considerations of aligners. *J Calif Den Assoc* 2006; 34: 793–805

Boyd RL. Esthetic orthodontic treatment using the Invisalign appliance for moderate to complex malocclusions. *J Dent Educ* 2008; 72: 948–967

Brachwitz J. Über die Bedeutung der Ästhetik für die Erwachsenenkieferorthopädie. Kieferorthop 2001; 15 (Sonderheft Invisalign): 7-10

Brachwitz J, Miethke RR. Die Entwicklungsgeschichte von Align Technology. Kieferorthop 2001; 15 (Sonderheft Invisalign): 55-56

Burstone CJ, Koenig HA. Force systems from an ideal arch. Am J Orthod 1974; 65: 270–289

Buschang PH, Shaw SG, Ross M, Crosby D, Campbell PM. Comparative time efficiency of aligner therapy and conventional edgewise braces. Angle Orthod 2014; 84: 391-396

Cooper-Kazaz R, Ivgi I, Canetti L, Bachar E, Tsur B, Chaushu S, Shalish M. The impact of personality on adult patients' adjustability to orthodontic appliances. Angle Orthod 2013; 83: 76–82

Cottingham LL. Gnathologic clear plastic positioner. Am J Orthod 1969; 55: 23–31

Djeu G, Shelton C, Maganzini A. Outcome assessment of Invisalign and traditional orthodontic treatment compared with the American board of orthodontics objective grading system. Am J Orthod Dentofacial Orthop 2005; 128: 292–298

Doung T, Derakhshan MG. Advantages of the Invisalign® system. In: Tuncay OC, Hrsg. The Invisalign® System. New Malden, United Kingdom: Quintessenz; 2006: 215-222

Drake CT, McGorray SP, Dolce C, Nair M, Wheeler TT. Orthodontic tooth movement with clear aligners. ISRN Dent 2012; 2012: 657973

Elsasser WA. Some observations on the history and uses of the Kesling positioner. Am J Orthod 1950; 36: 368–374

Engelke B. Kraft- und Drehmomentabgabe thermoplastisch geformter Schienen bei Frontzahnderotation vor und nach Alterungssimulation. Inaugural-Dissertation, Medizinische Fakultät, Georg-August-Universität Göttingen, 2010

Fonseca LM, de Araújo TM, Santos AR, Faber J. Impact of metal and ceramic fixed orthodontic appliances on judgments of beauty and other face-related attributes. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2014; 145: 203–206

Garino F, Garino B. The OrthoCAD iOC intraoral scanner: A six-month user report. *J Clin Orthod* 2011; 45: 161–164

Giancotti A, Mampieri G, Greco M. Correction of deep bite in adult using the invisalign system. *J Clin Orthod* 2008; 42: 719–726

Giancotti A, Farina A. Treatment of collapsed arches using the invisalign system. *J Clin Orthod* 2010; 44: 416–425

Giancotti A, Garino F, Mampieri G. Lower incisor extraction treatment with the Invisalign® technique: three case reports. *J Clin Orthod* 2015; 42: 33-44

Göz G, 2010: Stellungnahme der DGKFO zur Behandlung mit Alignern – Stand Januar 2010. Internet: www.dgkfo-vorstand.de/veroeffentlichungen/stellungnahmen/ (Zugriffsdatum: 17.03. 2013).

Grobe J. Dreidimensionale Analyse der Effektivität von Invisalign-Behandlungen. Inaugural-Dissertation, Medizinische Fakultät, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 2011

Guarneri MP, Oliverio T, Silvestre I, Lombardo L, Siciliani G. Open bite treatment using clear aligners. *Angle Orthod* 2013; 83: 913–919.

Hauschopp N. Effektivität der Invisalign-Teen-Behandlung-Validierung einer Analyse-Methode. Inaugural-Dissertation, Medizinische Fakultät, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 2012

Hoggan BR, Sadowsky C. The use of palatal rugae for the assessment of anteroposterior tooth movements. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2001; 119: 482–488

Joffe L. Invisalign®: early experiences. *J Orthod* 2003; 30: 348–352

Kahl-Nieke B. Orthodontische Zahnbewegung. In: Kahl-Nieke B, Hrsg. Einführung in die Kieferorthopädie. München: Urban&Schwarzenberg, 1995: 131–137

Kahl-Nieke B, 2010: Überarbeitung der Stellungnahme Optimaler Zeitpunkt für die Durchführung kieferorthopädischer Maßnahmen (unter besonderer Berücksichtigung der kieferorthopädischen Frühbehandlung). Internet: <http://www.dgkfo-vorstand.de/veroeffentlichungen/stellungnahmen/> (Zugriffsdatum: 12.2.2016)

Karkhanechi M, Chow D, Sipkin J, Sherman D, Boylan RJ, Norman RG, Craig R, Cisneros GJ. Periodontal status of adult patients treated with fixed buccal appliances and removable aligners over one year of active orthodontic therapy. Angle Orthod 2013; 83: 146–151

Kassas W, Al-Jewair T, Preston CB, Tabbaa S. Assessment of Invisalign treatment outcomes using the ABO model grading system. J World Fed Orthod 2013; 2: 61–64

Keilig L, Piesche K, Jäger A, Bourauel C. Applications of surface–surface matching algorithms for determination of orthodontic tooth movements. Comput Methods Biomech Biomed Engin 2003; 6: 353–359

Kesling H. The philosophy of the tooth positioning appliance. Am J Orthod Oral Surg 1945; 3: 297–304

Kesling H. Coordinating the predetermined pattern and tooth positioner with conventional treatment. Am J Orthod Oral Surg 1946; 32: 285–293

Kou E, Hordt C. Attachments in der Invisalign-Therapie. Kieferorthop 2001; 15 (Sonderheft Invisalign): 25-28

Kou E, Duong T. Invisalign® Attachments: Materials. In: Tuncay OC, Hrsg. The Invisalign® System New Malden. United Kingdom: Quintessenz, 2006: 91-97

Kravitz ND, Kusnoto B, Agran B, Viana G. Influence of attachments and interproximal reduction on the accuracy of canine rotation with Invisalign. Angle Orthod 2008; 78: 682–687

Kravitz ND, Kusnoto B, BeGole E, Obrez A, Agran B. How well does Invisalign work? A prospective clinical study evaluating the efficacy of tooth movement with Invisalign. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2009; 135: 27–35

Krieger E, Seiferth J, Saric I, Jung BA, Wehrbein H. Accuracy of Invisalign® treatments in the anterior tooth region. First results. *J Orofac Orthop* 2011; 72: 141–149

Krieger E, Seiferth J, Marinello I, Jung BA, Wriedt S, Jacobs C, Wehrbein H. Invisalign® treatment in the anterior region. *J Orofac Orthop* 2012; 73: 365–376

Mampieri G, Giancotti A. Invisalign technique in the treatment of adults with pre-restorative concerns. *Prog Orthod* 2013; 14: 40

McKenna S. Invisalign: technology or mythology? *J Mass Dent Soc* 2001; 50: 8–9

Meier DB, Wiemer KB, Miethke R-R. Invisalign®-Patient Profiling. *J Orofac Orthop* 2003; 64: 352–358

Melkos AB. Advances in digital technology and orthodontics: a reference to the Invisalign method. *Med Sci Rev* 2005; 11: 139–142

Miethke RR, Brauner K. A Comparison of the Periodontal Health of Patients during treatment with the Invisalign® system and with fixed lingual appliances. *J Orofac Orthop* 2007; 68: 223–231

Miller RJ, Duong TT, Derakhshan M. Lower incisor extraction treatment with the Invisalign system. *J Clin Orthod* 2002; 36: 95–102

Miller KB, McGorray SP, Womack R, Quintero JC, Perelmuter M, Gibson J, Dolan T, Wheeler T. A comparison of treatment impacts between Invisalign aligner and fixed appliance therapy during the first week of treatment. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2007; 131: 302.e1-9

Moshiri M, Eckhart JE, McShane P, German DS. Consequences of poor oral hygiene during aligner therapy. *J Clin Orthod* 2013; 47: 494–498

Nedwed V, Miethke R-R. Motivation, acceptance and problems of Invisalign patients. J Orofac Orthop 2005; 66: 162–173

Phan X. Clinical limitations of invisalign. J Can Dent Assoc 2007; 73: 263

Ponitz RJ. Invisible retainers. Am J Orthod 1971; 59: 266–272

Rinchuse D, Rinchuse D. Active tooth movement with essix-based appliances. J Clin Orthod 1997; 31: 109–112

Rollet D, Graindorge J, Guezennec P. Ein neues Therapiekonzept: Die Elastodontie. Inf Orthod Kieferorthop 1991; 23: 527–544

Rost D, Schwarze CW, Hilgers RD. Materialeigenschaften der Werkstoffe für Positioner - eine In-vitro-Untersuchung. J Orofac Orthop 1993; 54: 71–75

Rost D, Schwarze CW, Hilgers RD. Die Kraftabgabe von Positionern bei unterschiedlicher Schneidezahnprotrusion. J Orofac Orthop 1995; 56: 104–109

Rosvall MD, Fields HW, Ziuchkovski J, Rosenstiel SF, Johnston WM. Attractiveness, acceptability, and value of orthodontic appliances. Am J Orthod Dentofacial Orthop 2009; 135: 276–277

Roth R, Gordon W. Der gnathologische Positioner. Inf Orthod Kieferorthop 1981; 13: 125–148

Sander C. Biochmechanik. In: Sander FM, Schwenzer N, Ehrenfeld M, Hrsg. Kieferorthopädie, Stuttgart, New York, Dehli, Rio: Georg Thieme, 2011: 314–327

Schopf P. Rezidiv/Retention. In: Schopf P., Hrsg. Curriculum Kieferorthopädie. Berlin: Quintessenz Verlags-GmbH, 2000: 291–295

Schopf P. Mechanik - Kräfte - Verankerungen. In: Schopf P, Hrgs. Curriculum Kieferorthopädie. Berlin: Quintessenz Verlags-GmbH, 2008: 496–516

Schott TC, Göz G. Color fading of the blue compliance indicator encapsulated in removable clear Invisalign Teen® aligners. Angle Orthod 2011; 81: 185–191

Schupp W, Haubrich J, Neumann I. Treatment of anterior open bite with the Invisalign system. *J Clin Orthod* 2010a; 44: 501–507

Schupp W, Haubrich J, Neumann I. Class II correction with the Invisalign system. *J Clin Orthod* 2010b; 44: 28–35

Schupp W, Haubrich J. Möglichkeiten und Grenzen der Invisalign-Behandlung. *Quintessenz Sonderdruck* 2010c; 61: 951-962

Sergl HG. Der Idealisator-ein funktionelles Endgerät aus weichbleibendem Kunststoff. *J Orofac Orthop* 1989; 50: 338–346

Shalish M, Cooper-Kazaz R, Ivgi I, Canetti L, Tsur B, Bachar E, Chaushu S, Adult patients' adjustability to orthodontic appliances. Part I: a comparison between Labial, Lingual, and InvisalignTM. *Eur J Orthod* 2012; 34: 724–730

Sheridan J, Ledoux W, McMinn R. Essix retainers: fabrication and supervision for permanent retention. *J Clin Orthod* 1993; 27: 37–45

Sheridan J, Ledoux W, McMinn R. Essix Appliances: Minor tooth movement with divots and windows. *J Clin Orthod* 1994; 28: 659–664

Sheridan J, McMinn R, Ledoux W. Essix thermosealed appliances: various orthodontic uses. *J Clin Orthod* 1995; 29: 108–113

Simon M, Keilig L, Schwarze J, Jung BA, Bourauel C. Treatment outcome and efficacy of an aligner technique - regarding incisor torque, premolar derotation and molar distalization. *BMC Oral Health* 2014; 14: 68

Tjan AHL, Miller GD. The JGP. Some esthetic factors in a smile. *J Prosthet Dent* 1984; 51: 24–28

Tuncay OC, Bowman SJ, Nicozisis JL, Amy BD. Effectiveness of a compliance indicator for clear aligners. *J Clin Orthod* 2009; 43: 263–268

Tuncay O, Bowman SJ, Amy B, Nicozisis J. Aligner treatment in the teenage patient. *J Clin Orthod* 2013; 47: 115–119

Turatti G, Womack R, Bracco P. Incisor intrusion with Invisalign treatment of an adult periodontal patient. J Clin Orthod 2006; 40: 171–174

Vlaskalic V, Boyd R, Hordt C, Miethke RR. Die kieferorthopädische Behandlung mit dem Invisalign-System. Kieferorthop 2001; 15 (Sonderheft Invisalign): 17-24

Vorhies J. Short, Intensive use of tooth positioners and an appraisal of the results. Angle Orthod 1960; 30: 248

Wells NE. Application of the positioner appliance in orthodontic treatment. Am J Orthod 1970; 58: 351–366

Womack WR. Four-premolar extraction treatment with Invisalign. J Clin Orthod 2006; 40: 493–500

Wong BH. Invisalign A to Z. Am J Orthod Dentofacial Orthop 2002; 121: 540–541